

Treball de Fi de Màster

Màster universitari en enginyeria industrial

**Anàlisi de la influència de diferents paràmetres
d'impressió en el comportament mecànic de
peces obtingudes per *Fused Filament
Fabrication* (FFF)**

MEMÒRIA

Autor: Ferran Gil Ginebra
Director: Roger Uceda Molera
Convocatòria: Maig 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquests darrers anys la popularitat i l'evolució de la impressió 3D han estat exponencials. Cada cop existeixen més tècniques de fabricació additiva que permeten obtenir molt bons resultats amb multitud de materials, ja no només amb materials plàstics, també amb materials metàl·lics i ceràmics. A més a més la impressió additiva cada cop esta assolint més protagonisme en sectors molt diversos. Per poder assolir aquest nivell de desenvolupament, s'han realitzat molts estudis, la majoria enfocats en mesurar les propietats mecàniques o les toleràncies dimensionals de peces impreses.

Aquest treball té com a objectiu estudiar la influència existent entre diferents paràmetres d'impressió sobre el comportament mecànic de les peces. Per realitzar-ho s'ha utilitzant una màquina de fabricació additiva amb tecnologia *Fusion Filament Fabrication* (FFF) i àcid polilàctic (PLA) com a material d'impressió.

Per estudiar quina relació hi ha, s'han modificat tres paràmetres a l'hora d'imprimir les mostres, a dos nivells, donant lloc a un disseny factorial de dos nivells i tres factors (2^3). Aquests tres factors són: la densitat d'infill (20 – 25%), el gruix de la paret (1,2 – 1,6 mm) i la morfologia de l'infill, que s'ha variat imprimint-lo be amb un capçal de 0,4 mm o be amb un de 0,8 mm. La resta de factors romandran constants per totes les mostres.

La metodologia que s'havia previst utilitzar inicialment per fer aquest estudi va haver de ser modificada degut a l'etapa extraordinària de confinament. Finalment les tècniques utilitzades han estat l'assaig de tracció, la modelització per elements finits, l'anàlisi visual i l'estudi estadístic del temps d'impressió. Aquestes tècniques han permès determinar que imprimir la part del infill amb un capçal més gruixut (0,8 mm), malgrat reduir significativament el temps d'impressió, una redueix de manera important la deformació a fractura i el treball de fractura respecte a les peces que tenen un infill imprès amb el capçal de 0,4 mm, resultant en peces més fràgils, com demostren els resultats obtinguts en els assaigs de tracció. Això es pot atribuir a una distribució de tensions menys homogènia, que fa que per una mateixa deformació hi hagi punts on es concentrin tensions més elevades, com mostra l'estudi per elements finits. Addicionalment, la inspecció visual ha revelat que les mostres amb infill de 0,8 mm contenen un gran nombre de defectes, que comprometen les propietats mecàniques i el nivell d'acabat. També s'ha observat que el fet de tenir una paret més gruixuda contribueix a una millora significativa de les propietats mecàniques i a una distribució de tensions més homogènia. Filament, s'ha observat que la diferencia d'utilitzar un percentatge d'infill del 20 o 25% en termes de resistència a la tracció no es significativa però si que ho és a l'hora d'analitzar el mòdul d'elasticitat.

Sumari

1. GLOSSARI	12
2. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS	13
2.1. Objectius del projecte	14
2.2. Abast del projecte	14
3. ESTAT DE L'ART	15
3.1. Història de la fabricació additiva	15
3.2. Vies de desenvolupament actual de la impressió 3D	18
3.3. Tecnologies actuals de fabricació additiva	19
3.3.1. Fotopolimerització en tanc (<i>Vat Photopolimerization</i>)	19
3.3.1.1. Estereolitografia (SLA)	20
3.3.1.2. Fotopolimerització per llum projectada (DLP)	21
3.3.2. Extrusió de material (<i>Material Extrusion</i>)	21
3.3.3. Superposició de làmines (LOM)	22
3.3.4. Fusió en llit de pols (<i>Powder Bed Fusion</i>)	23
3.3.5. Projectió d'aglomerant (<i>Binder Jetting</i>)	25
3.3.6. Projectió de material (<i>Material Jetting</i>)	26
3.3.7. Disposició directa d'energia (<i>Direct Energy Deposition</i>)	27
3.4. Fabricació per Filament Fos (FFF)	28
3.4.1. Descripció del procés d'impressió FFF	28
3.4.2. La implementació del doble extrusor independent en la FFF	30
3.4.3. Paràmetres d'impressió rellevants en la tecnologia FFF	33
3.4.4. Comparació entre el FFF, el SLA i el SLS	37
3.5. Impressora Sigma de BCN3D Technologies	39
3.5.1. Descripció i propietats	39
3.5.2. Components principals de la impressora	40
3.6. Materials	41
3.6.1. Principals materials emprats en la impressió FFF	43
3.6.1.1. ABS	43
3.6.1.2. PLA	45
3.6.2. Comparació entre el PLA i el ABS. Avantatges i inconvenients	46
4. MATERIALS I MÈTODES	48
4.1. Disseny experimental	48
4.2. Preparació de mostres	49
4.2.1. Disseny de les provetes	49
4.2.2. Paràmetres d'impressió de les provetes	50

4.2.2.1. Nombre de <i>capçals d'impressió</i>	50
4.2.2.2. Gruix de paret	51
4.2.2.3. Densitat d'Infill	52
4.2.2.4. Altres paràmetres d'impressió rellevants	53
4.2.3. Nomenclatura de les provetes	53
4.2.4. Impressió de les provetes	54
4.3. Tècniques de caracterització	56
4.3.1. Assaig de tracció.....	56
4.3.2. Simulació mitjançant elements finits	59
4.3.3. Anàlisi visual del acabat superficial i detecció de defectes.....	61
4.3.4. Anàlisi dels temps d'impressió	61
5. RESULTATS I DISCUSSIÓ	62
5.1. Assaig de tracció.....	62
5.1.1. Gràfics tensió deformació	62
5.1.2. Resistència a tracció aparent.....	63
5.1.3. Mòdul de Young aparent.....	65
5.1.4. Deformació a fractura.....	67
5.1.5. Treball de fractura.....	69
5.2. Modelització per elements finits	71
5.2.1. Distribució de tensions	71
5.2.1.1. Distribució de tensions a la cara lateral	71
5.2.1.2. Distribució a la cara superior	72
5.2.1.3. Distribució interna.....	73
5.3. Inspecció visual.....	74
5.4. Estudi dels temps d'impressió	78
5.5. Anàlisi de l'efecte de les variables en les diferents respostes estudiades...	81
6. ESTUDI ECONÒMIC	82
7. ESTUDI AMBIENTAL	84
7.1. Material d'impressió	84
7.2. Recursos utilitzats pels equips.....	84
7.3. Serveis generals	84
CONCLUSIONS	85
AGRAÏMENTS	87
REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES	88

Índex de figures

Figura 2.1 Triangle de variables bàsiques a optimitzar [1].....	13
Figura 3.1 Esquemes de la patent de Chuck Hull [3].....	15
Figura 3.2 Primera impressora tridimensional [4].	16
Figura 3.3 Nombre de patents mundials relacionades amb la fabricació additiva [5].....	16
Figura 3.4 Cronograma de les principals aplicacions [9].	17
Figura 3.5 Corva de Gartner de la indústria 3D [10].	18
Figura 3.6 Fabricació additiva mitjançant SLA [15].....	20
Figura 3.7 Fabricació additiva mitjançant DLP [20].....	21
Figura 3.8 Fabricació d'una peça mitjançant l'extrusió de material [22].	22
Figura 3.9 Esquema del procés de fabricació per superposició de làmines [25].	23
Figura 3.10 Esquema del procés de fabricació per llit de pols [28].....	24
Figura 3.11 Esquema del procés de fabricació per projecció d'aglomerant [31].....	25
Figura 3.12 Esquema del procés de fabricació per projecció de material [36].....	26
Figura 3.13 Esquema del procés de fabricació per projecció de material [39].....	27
Figura 3.14 Esquema de les diferents tecnologies de 3D Printing [40].....	28
Figura 3.15 Esquema de les diferents tecnologies de 3D Printing [41].....	29
Figura 3.16 Esquema del funcionament de la tecnologia FFF [42].....	29
Figura 3.17 Impressora 3D amb dos extrusors independents [41].	30
Figura 3.18 Comparació entre l'ús de un doble extrusor convencional i un d'independent en termes de contaminació de la mostra [44].....	31
Figura 3.19 Impressora 3D imprimint dues peces iguals a l'hora [45].....	31

Figura 3.20 Impressió de peces amb efecte mirall [46].....	32
Figura 3.21 Impressió de peces amb voladís [47].	32
Figura 3.22 Vista d'alçades de capa de 50, 200 i 300 micres (d'esquerra a dreta) [50].	33
Figura 3.23 Vista de mostres amb diferent densitat d'infill [51].	34
Figura 3.24 Representació del gruix de paret [52].	34
Figura 3.25 Valors del gruix de paret per cada material [53].....	35
Figura 3.26 Exemple dels patrons més utilitzats [54].....	35
Figura 3.27 Esquema de la fusió del material [56].	36
Figura 3.28 Esquemàtic de la impressora BCN3D Sigma R19 [59].....	39
Figura 3.29 Capçal e3D utilitzat a la impressora Sigma R19 [61].	40
Figura 3.30 Esquemàtic d'un extrusor Bondtech™ [63].	40
Figura 3.31 Impressió 3D d'una maqueta utilitzant ABS [66].	41
Figura 3.32 Pròtesis de titani creada mitjançant la impressió 3D [71].	42
Figura 3.33 Peça decorativa de ceràmica creada mitjançant la impressió 3D [73].	43
Figura 3.34 Estructura del ABS [76].	44
Figura 3.35 Obtenció del PLA [81].	45
Figura 4.1 Mesures en mm de la proveta utilitzada Type I de la ASTM D638-02a amb un gruix de 7mm [90][89].	49
Figura 4.2 Planta, alçat i perfil de les provetes impreses.	50
Figura 4.3 Estructura de les provetes a) Tota impresa amb un capçal de 0,4 mm; b) Contorns impresos amb un capçal de 0.4 mm i l'infill amb un de 0.8 mm.	51
Figura 4.4 Gruixos de parets utilitzats. a) 1,2 mm; b) 1,6mm.	51
Figura 4.5 Mostra impresa amb doble capçal i un infill del 20%.	52
Figura 4.6 Mostra impresa amb doble capçal i un infill del 25%.	52

Figura 4.7 Mostres fabricades amb un capçal de 0.4 mm	54
Figura 4.8 Mostres fabricades amb doble capçal independent.....	55
Figura 4.9 Màquina INSTRON 3366 empleada durant l'assaig amb detall del extensòmetre.	57
Figura 4.10 Vista isomètrica i de secció d'una canya de proveta dissenyada amb SolidWorks.	60
Figura 4.11 Exemple de malla utilitzada per la simulació.	60
Figura 4.12 Condicions de contorn emprades per la simulació.	61
Figura 5.1 Gràfics tensió-deformació de les mostres assajades.....	62
Figura 5.2 Valors obtinguts de l'estudi ANOVA dels resultat de resistència de tracció.	63
Figura 5.3 Pendent de la corba tensió deformació en zona de baixes deformacions.	66
Figura 5.4 Valors obtinguts de l'estudi ANOVA del mòdul d'elasticitat aparent.	67
Figura 5.5 Determinació del valor de deformació a fractura.	68
Figura 5.6 Resultats de l'estudi ANOVA de la deformació a fractura.....	69
Figura 5.7 Gràfic força-desplaçament de la mostra 04_B_1 obtingut experimentalment	69
Figura 5.8 Resultats de l'estudi ANOVA del treball de fractura.....	70
Figura 5.9 Distribució de tensions de la cara lateral de les mostres.	71
Figura 5.10 Distribució de tensions de la cara superior de les mostres.	72
Figura 5.11 Distribució de tensions de la secció interna de les mostres.....	73
Figura 5.12 Detall de la mostra DUAL_A_2.....	74
Figura 5.13 Detall del defecte superficial de la mostra DUAL_B_2.	75
Figura 5.14 Detall de la falta d'adhesió de la mostra 04_B_4.....	76
Figura 5.15 Representació d'una mala calibració dels eixos dels capçals.....	77

Figura 5.16 Detall del resultat d'una mala calibració dels eixos (mostra DUAL_B_5).....	77
Figura 5.17 Gràfica dels tipus d'efectes.....	78
Figura 5.18 Gràfica dels efectes principals de la resposta Temps.....	79
Figura 5.19 Gràfica dels efectes d'interacció entre infill i capçal de la resposta Temps.....	80
Figura 5.20 Gràfica dels efectes d'interacció entre més valors d'infill i capçal de la resposta Temps.	80

1. Glossari

AM – Additive Manufacturing

FA – Fabricació Additiva

FFF – Fused Filament Fabrication

FDM – Fused Deposition Modeling

SLA – Stereolithography

SLS – Selective Laser Sintering

LOM – Laminated Object Manufacturing

DLP – Digital Light Processing

DOE – Design of Experiments

PLA – Polylactic Acid (Àcid Polilàctic)

ABS – Acrylonitrile butadiene styrene (Acrilonitril Butadiè Estirè)

2. Introducció i objectius

La impressió 3D és una tecnologia que actualment es troba en plena expansió degut al fet de poder realitzar peces poroses, alleugerint components i estalviant material, mantenint els requeriments mecànics. L'auge que està tenint aquesta tecnologia és també una font d'interès per tal de desenvolupar noves tecnologies de fabricació additiva i millores en l'optimització de les tecnologies d'impressió més consolidades. Alguns exemples d'aquestes evolucions i optimitzacions dels processos poden ser: la utilització de nous materials metàl·lics, polimèrics o ceràmics així com el desenvolupament del doble extrusor independent.

Tot procés de fabricació additiva posseeix tres variables bàsiques que defineixen les característiques de la peça. Aquestes tres variables són: la rugositat o l'acabat superficial, el temps d'impressió i les propietats mecàniques de la peça resultant. Aquestes tres variables estan relacionades entre elles de tal manera que quan en volem millorar una, almenys una de les altres dues empitjora.

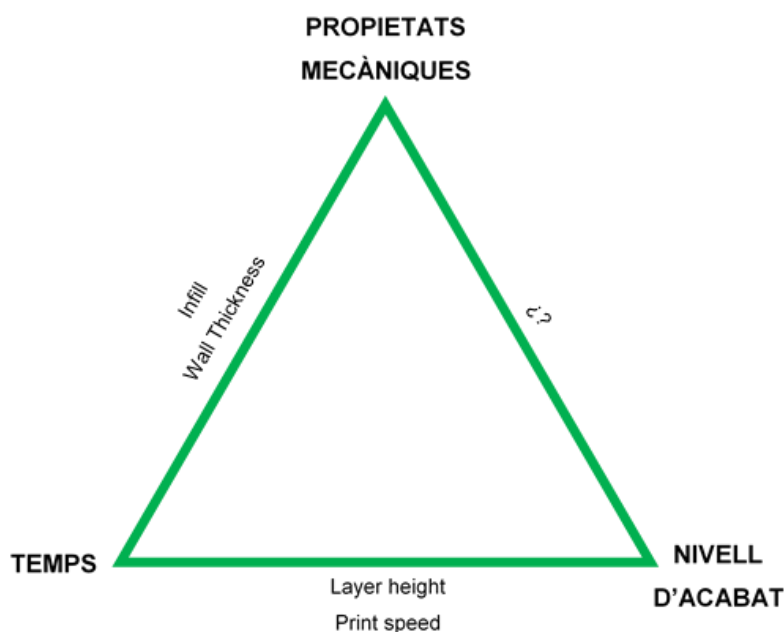


Figura 2.1 Triangle de variables bàsiques a optimitzar [1].

Per exemple, si es vol imprimir amb bons acabats; les propietats mecàniques seran pitjors i el temps d'impressió augmentarà perquè cal imprimir tota la peça amb un broquet de diàmetre petit per garantir un bon nivell de detall. Si per contra es vol tenir unes bones propietats mecàniques, seria interessant imprimir amb un capçal més gruixut el que comportaria uns pitjors acabats superficials.

Una possible solució a aquest problema pot ser la impressió multicapçal ja que ens permet realitzar peces de major complexitat. Per exemple utilitzar un boquet fi per l'exterior i un de gruixut per l'interior. Això ens permet obtenir bons acabats superficials (treballant amb un broquet de menor diàmetre a l'exterior de la peça) i bones propietats mecàniques amb una velocitat superior (treballant amb un broquet de major diàmetre a l'interior). Al ser una tecnologia nova sense gaire investigació al darrera cal avaluar quins efectes té.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del present projecte és analitzar i avaluar la influència de diferents paràmetres d'impressió en el comportament mecànic de les peces. Aquest objectiu es desglossa en quatre objectius específics:

- [1]** L'anàlisi i estudi comparatiu a nivell bibliogràfic de les diverses tecnologies de fabricació additiva. Concretament, s'ha analitzat amb detall la fabricació amb filament fos (FFF).
- [2]** L'avaluació de diferents paràmetres significatius a l'hora de produir peces per tal de determinar els seus efectes sobre les propietats mecàniques.
- [3]** Analitzar els defectes d'impressió sorgits, determinar-ne l'efecte aproximat sobre el comportament mecànic i proposar-ne la solució.
- [4]** Determinar mitjançant elements finits quina és la distribució de tensions de les diferents series.

2.2. Abast del projecte

En aquest projecte fi de màster, es pretén analitzar, caracteritzar i definir tots els mètodes i materials emprats en els principals processos de fabricació additiva. S'analitzarà amb profunditat la utilització d'una tècnica innovadora com es la impressió amb dos capçals independents. Finalment s'avaluarà la influència de diferents paràmetres en el comportament mecànic de les peces mitjançant diversos assajos i simulacions.

3. Estat de l'art

3.1. Història de la fabricació additiva

La manufactura additiva té les seves arrels en la topografia i la fotoescultura, que daten de fa gairebé 150 anys. Aquestes dues tècniques inicials, purament manuals, sobretot si les comparem amb les tècniques actuals, que aconsegueixen uns nivells d'automatització i sofisticació molt elevats, tenien com a objectiu crear un objecte amb volum i forma lliure mitjançant una superposició de capes [2].

L'inici de la impressió 3D data de 1976, quan es va inventar la impressora d'injecció de tinta. L'any 1984, després de certes adaptacions i desenvolupaments sobre el concepte d'injecció de tinta van transformar la tecnologia d'impressió amb tinta a impressió amb materials.

Durant aquests anys van començar a aprovar-se patents sobre processos de fabricació additiva, sent la primera d'elles la d'empresa 3D System anomenada "Aparells per a la producció d'objectes tridimensionals mitjançant Estereolitografia" l'any 1984 de la mà de Chuck Hull co-fundador d'aquesta mateixa empresa [3].

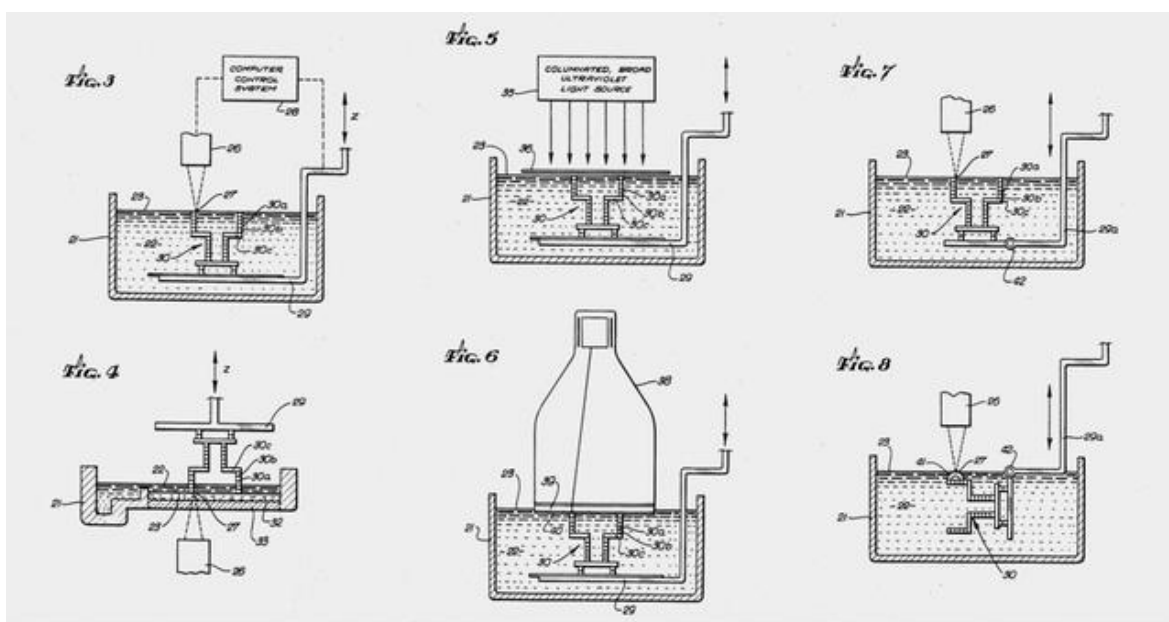


Figura 3.1 Esquemes de la patent de Chuck Hull [3].

Els sistemes de prototipatge ràpid, o fabricació additiva, van sorgir per primera vegada en 1987 amb el procés de estereolitografia (*StereoLithography* – SL) per part de l'empresa 3D Systems, que fabricaven objectes a partir de la solidificació de resina fotosensible mitjançant làser. Un any més tard també van aparèixer sistemes de fabricació additiva a Europa: la màquina Mark 1000 SL de la companyia irlandesa Quadrax i la línia STEREOS de l'alemanya EOS.



Figura 3.2 Primera impresora tridimensional [4].

Durant els anys noranta, es varen patentar diverses noves tecnologies de fabricació additiva com per exemple la tecnologia *Selective Laser Sintering* (SLS). A més a més es van anar millorant i optimitzant les tècniques existents ja que moltes d'elles es trobaven en fase inicial i patien problemes de *warping* i eren terriblement cares pels consumidors [4].

Els anys més fructífers en el desenvolupament de la fabricació additiva van ser sense cap mena de dubte els primers anys del 2000. Una dada que ho justifica és el creixement exponencial que pateixen el nombre de patents relacionades amb la fabricació additiva, tal i com es pot veure a la Figura 3.3f.

ADDITIVE MANUFACTURING PATENTS ISSUED WORLDWIDE

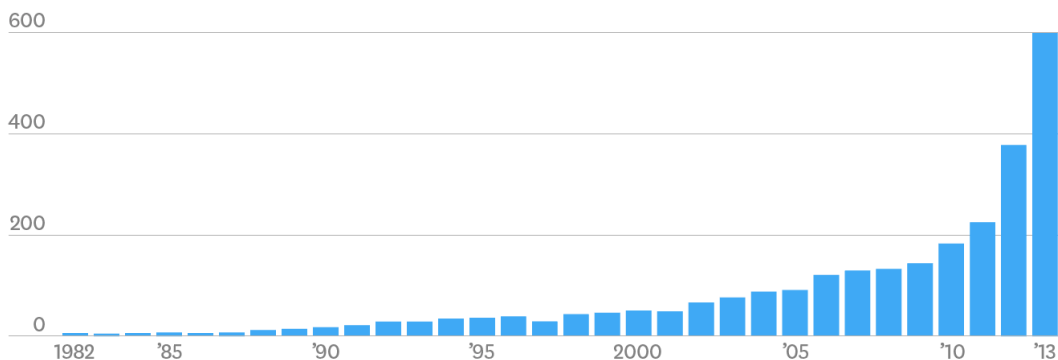


Figura 3.3 Nombre de patents mundials relacionades amb la fabricació additiva [5].

Aquest augment tan notable de patents va directament relacionat amb un major desenvolupament de la tecnologia, amb especial ressò dins del sector mèdic on durant els inicis del 2000 es van desenvolupar múltiples aplicacions amb un gran valor afegit.

Els primers que van aconseguir desenvolupar una aplicació de la fabricació additiva en el sector mèdic van ser els científics de l'Institut de Medicina Regenerativa Wake Forest, els quals, van imprimir suports estructurals sintètics d'una bufeta humana i després els van cobrir amb cèl·lules de pacients humans. El teixit un cop generat es va implantar en els pacients, sabent que les probabilitats de rebuig per part del seu sistema immunològic eren mínimes, ja que estaven fets de les seves pròpies cèl·lules [6]. Aquesta fita va ser només el començament, en tan sols 10 anys, científics de diferents institucions van fabricar un ronyó en miniatura funcional, van construir una cama protètica amb components complexos que es van imprimir dins de la mateixa estructura, i van bio-imprimir els primers vasos sanguinis utilitzant només cèl·lules humanes [7].

Aquesta va ser també la dècada en la qual la impressió en 3D es va trobar amb el moviment del codi obert. L'any 2004, el projecte RepRap del Dr. Adrian Bowyer va llançar una iniciativa de codi obert, basat en la tecnologia FFF, per a crear una impressora 3D que bàsicament pogués construir-se per si mateixa, o almenys imprimir la majoria de les seves pròpies peces. RepRap ha revolucionat el món de la impressió 3D des de la seva aparició fins als nostres dies, ja que està disponible sota una llicència lliure que fa que es puguin copiar, estudiar i distribuir els seus dissenys [8]. Això ha ajudat al fet que, en l'actualitat, sigui més o menys fàcil que qualsevol pugui disposar d'una impressora 3D d'una forma poc costosa. RepRap planteja grans canvis a nivell social i econòmic: menys fàbriques, menys necessitat de transport de materials, menys costos i més autonomia.

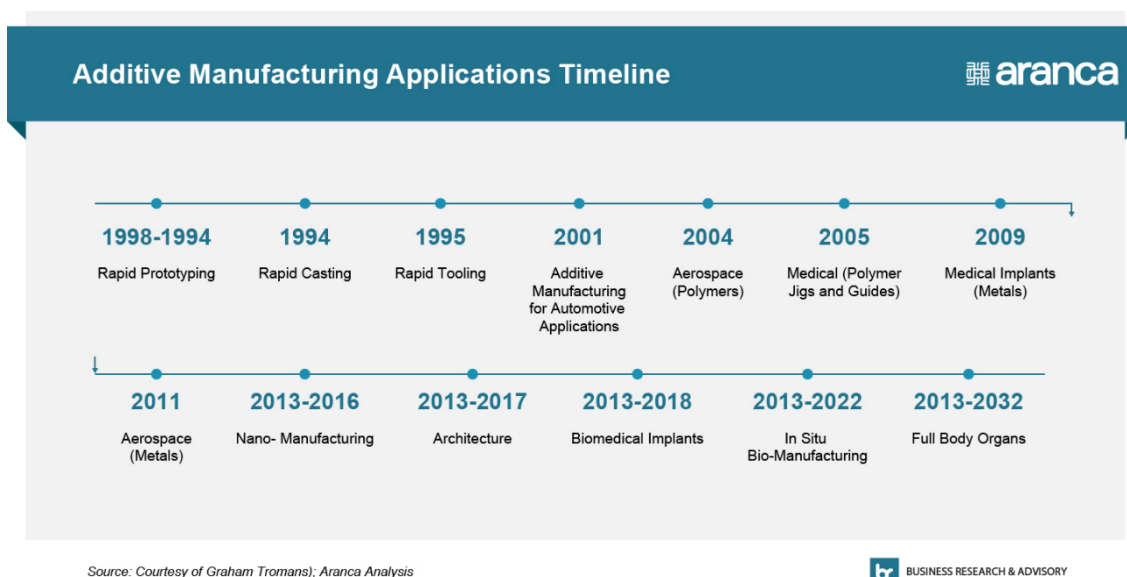


Figura 3.4 Cronograma de les principals aplicacions [9].

3.2. Vies de desenvolupament actual de la impressió 3D

La impressió 3D és indubtablement una de les innovacions tecnològiques que més seguidors ha adquirit en els últims anys. El fet de que amb molt poc temps s'hagi fet accessible i popular entre la societat obre possibles aplicacions de la impressió en altres àmbits tecnològics.

Alguns exemples d'aquests nous horitzons de la impressió tridimensional poden ser el sector de l'alimentació o el mèdic. Tots dos sectors, que fa uns anys semblava inimaginable que poguessin utilitzar la impressió en el seu entorn, aposten fortament per desenvolupar noves tecnologies d'impressió [10].

Relacionat precisament amb aquests nous horitzons de la impressió 3D s'han realitzat múltiples estudis. Una de les empreses d'investigació més reconegudes, Gartner, va publicar un cicle de sobreexpectació (també conegut com a corba de Gartner) de la indústria 3D. Aquest cicle permet veure de manera gràfica el futur de certes tecnologies. D'acord amb aquest estudi, les tendències que es troben al alça són investigacions basades en medicaments impresos en 3D, òrgans bio-impresos, impressió 3D de productes de consum propi o la impressió electrònica tridimensional.

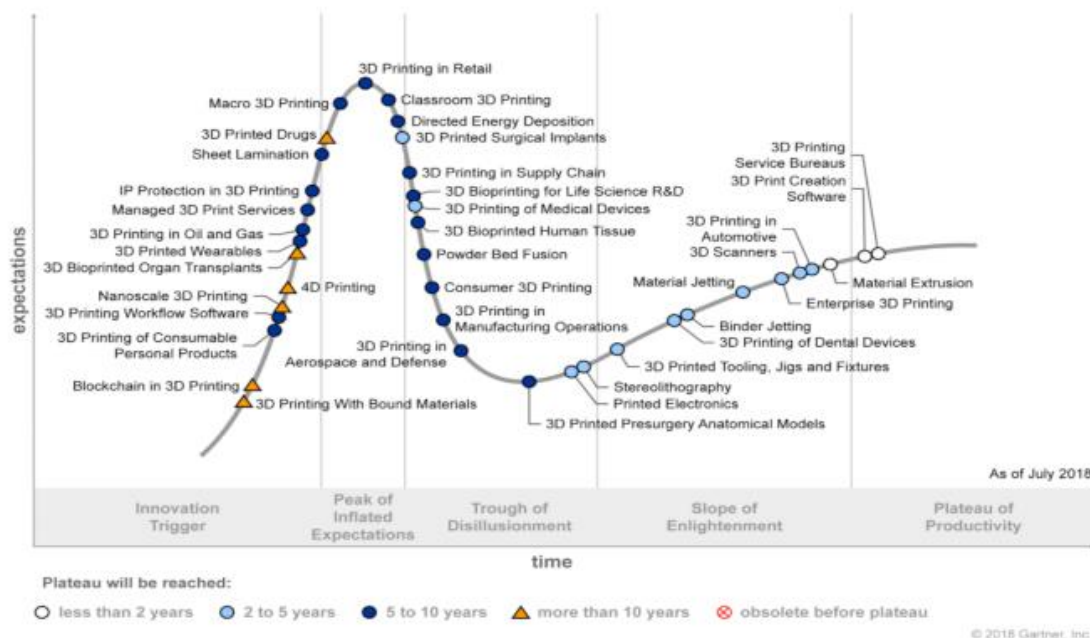


Figura 3.5 Corba de Gartner de la indústria 3D [10].

Cal recalcar que la corba Gartner ens mostra que la indústria 3D encara es troba encara fent els primers passos, té molts anys per davant i moltes tècniques que desenvolupar que sense cap dubte canviaran la manera en la qual vivim actualment.

3.3. Tecnologies actuals de fabricació additiva

Des de la creació de les tècniques de fabricació additiva en tres dimensions, el seu ús més important ha estat el prototipatge ràpid (*Rapid Prototyping*). Les característiques de la fabricació additiva són ideals per a dur a terme prototips ja que ofereix la possibilitat de fabricar-los a partir de models 3D dissenyats per ordinador sense necessitat de dissenyar i produir motlles o matrius amb l'elevat cost econòmic que comporta. A més a més, redueix el temps i abarateix el procés de disseny d'una nova peça per a qualsevol conjunt mecànic. Aquesta reducció de cost i temps, afavoreix a la producció de més prototips que permeten comprovar millor la seva funcionalitat i la detecció d'errors [11]. D'aquesta manera, els temps improductius es veuen reduïts juntament amb el cost de desenvolupament del producte ja que la detecció d'errors en fase productiva es veuran reduïts tal i com s'ha comentat anteriorment. Més concretament, segons certs estudis, el *Rapid Prototyping* (RP) permet reduir el *time-to-market* fins un 90% i els costos de desenvolupament del producte fins a un 70% [12].

Dins del RP existeixen diverses tecnologies diferents de fabricació additiva. Existeixen multitud de maneres de classificar-les depenent de la variable que prenguem. La manera més estàndard de classificar-les és basant-se en la normativa ISO/ASTM 52900:2015 [13], la qual, en la seva primera secció de terminologia defineix la següent classificació de la Fabricació Additiva en 7 grups principals.

3.3.1. Fotopolimerització en tanc (*Vat Photopolimerization*)

Aquesta tecnologia utilitza llum per tal d'activar selectivament i de manera precisa el curat d'un fotopolímer en un tanc. Englobades dins d'aquesta tecnologia trobem l'estereolitografia (SLA) i la fotopolimerització per llum projectada, ambdues presentades a continuació.

3.3.1.1. Estereolitografia (SLA)

La estereolitografia és considerada la primera tècnica de fabricació additiva, va ser patentada l'any 1986 per Charles W. Hull i comercialitzada per 3D Systems l'any 1987. És una de les tecnologies d'impressió 3D en la qual s'utilitza una resina de fotosensible líquida. Aquesta resina, es troba en una banyera, dins de la qual hi ha una safata que té moviment vertical. Al començar el procés d'impressió, la safata es col·loca a una distància de la superfície igual al gruix que tindrà la capa un cop curada pel làser ultraviolat (UV) [14][15]. El làser amb l'ajuda de miralls va recorrent la forma desitjada capa a capa, seguint un patró. Un cop escombrada tota la capa, la safata es mou cap avall una certa distància que equival al gruix de la capa. Aquest procés iteratiu acaba un cop s'ha completat la peça. Un cop acabada, la safata s'eleva actuant com un colador que deixa tot el polímer líquid a la banyera i deixant a la vista la peça definitiva. D'aquesta manera, es forma un model 3D sòlid a partir de disseny subministrat per l'ordinador.

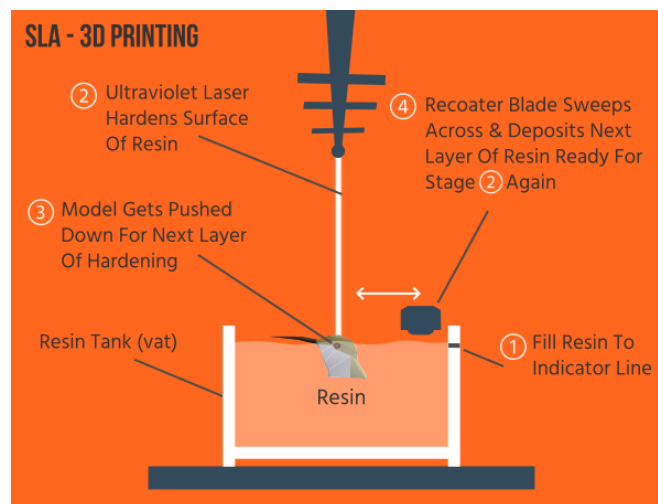


Figura 3.6 Fabricació additiva mitjançant SLA [15].

La tecnologia SLA, presenta una sèrie de limitacions [16] en les seves condicions de treball. La més important és la restricció que imposa el fet d'haver d'utilitzar polímers fotosensibles que siguin capaços de solidificar mitjançant una reacció química activada per un feix de llum. També existeixen altres limitacions com poden ser el gruix mínim de la capa que es pot assolir i l'error inevitable en el posicionament del làser. Referit en aquestes dues últimes limitacions, existeixen estudis com el fet per Ikuta [17], en el que assegura de manera teòrica que és possible reduir el gruix de la capa fins a 3 μm el que permetria una resolució de 13,3 milions d'elements per mm^3 . A la pràctica, les màquines comercials no poden arribar ni de bon tros a aquestes resolucions tan elevades.

3.3.1.2. Fotopolimerització per llum projectada (DLP)

El procés DLP es basa en la projecció d'una imatge creada en una pantalla LCD a la superfície que desitgem solidificar. Aquesta tecnologia es basa en una làmpada que genera una llum que es fa passar a través d'una pantalla on es generen les imatges de cada capa. Un cop projectada la imatge, generalment mitjançant làser, tota la capa rep llum simultàniament solidificant-se tota de cop. Com la imatge es digital, aquesta estarà formada per píxels quadrats també anomenats vòxels. La precisió i la qualitat de detall vindrà definida per la mida d'aquests píxels [18]. Com més petits, major nivell de detall assolirem. En aquesta tecnologia, Kochan i Hovtun [19] van establir que l'element limitant en quant a la resolució que es pot assolir és la rugositat superficial que limita el gruix entre capes, amb un valor mesurat de 4,22 μm (Ra).

Degut a que la imatge de la capa es projectada tota de cop, podem imprimir més ràpidament que amb una impressora SLA.

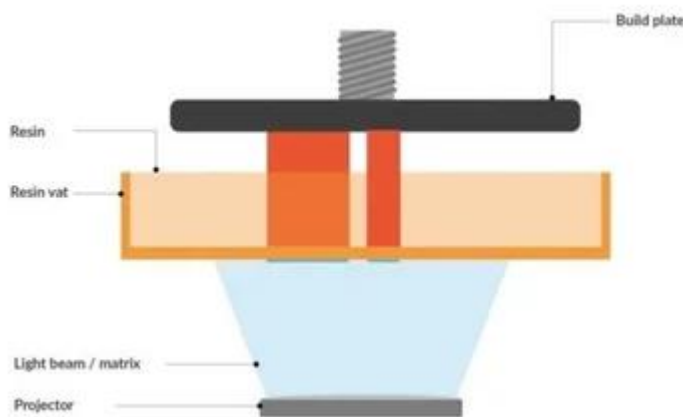


Figura 3.7 Fabricació additiva mitjançant DLP [20].

3.3.2. Extrusió de material (*Material Extrusion*)

L'extrusió de material és la tecnologia d'impressió 3D més estesa degut a la seva facilitat d'utilització i disseny compacte de les impressores. Pràcticament totes les impressores d'ús personal (*Desktop printers*) pertanyen a aquesta família. El procés d'impressió es basa en una extrusió de manera selectiva de material a través d'un orifici o boca, dipositant-lo sobre la superfície desitjada. La variants més destacada i en la que es basa aquest treball fi de màster és la tecnologia FFF o també coneguda com FDM.

El *Fused Filament Fabrication* (FFF) és un procés, en el qual, es parteix d'una bobina del material desitjat (generalment plàstic). Aquest filament és escalfat i després dipositat capa per capa sobre la superfície en es forma la peça. És una tècnica comunament utilitzada en moltes impressores 3D degut a la seva gran versatilitat. Un avantatge que proporciona precisament aquesta versatilitat és la possibilitat d'utilitzar diversos capçals de diàmetres diferents per tal de poder optimitzar els temps de fabricació, el nivell d'acabat i les propietats mecàniques [21].

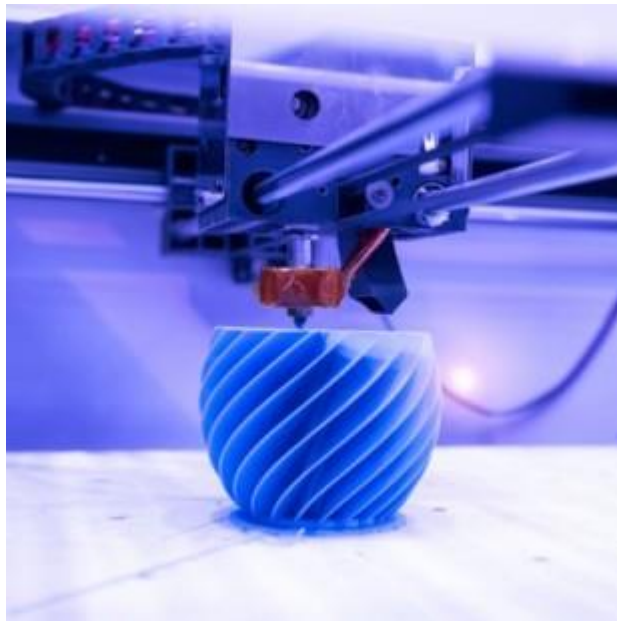


Figura 3.8 Fabricació d'una peça mitjançant l'extrusió de material [22].

El procés té molts factors que influeixen en la qualitat final del model, però té un gran potencial i viabilitat quan aquests factors es controlen amb èxit. Mentre que el FFF és similar a tots els altres processos d'impressió en 3D, ja que construeix capa per capa, varia en el fet que el material s'afegeix a través d'un boquet o extrusor sota pressió constant i en un flux continu. Aquesta pressió ha de mantenir-se constant i a una velocitat constant per permetre resultats precisos [23][23].

Donat doncs que la tecnologia FFF és l'emprada durant el present treball fi de màster, aquesta tecnologia serà desenvolupada amb més detall a l'apartat 3.4.

3.3.3. Superposició de làmines (LOM)

Aquest procés es basa en l'adhesió de diverses làmines del material desitjat de manera consecutiva. Les capes es formen gràcies a grans rotlles del material desitjat, que van avançant cada cop que cal crear una nova capa. Mitjançant un làser, aquestes làmines es van

tallant creant la forma desitjada. Un cop tallades, s'uneixen entre elles amb adhesiu i amb l'aplicació de calor i pressió. Per acabar, la plataforma baixa una distància equivalent al gruix de la làmina de materials per tal de poder-hi adherir a sobre la següent capa [24].

Els objectes laminats s'utilitzen sovint per a models estètics i visuals i no són adequats per a ús estructural ja que les seves propietats mecàniques no són elevades. El procés és a baixa temperatura i permet crear geometries internes. A més a més, permet unir diferents materials i requereix relativament poca energia ja que el material no es fon en la seva totalitat.

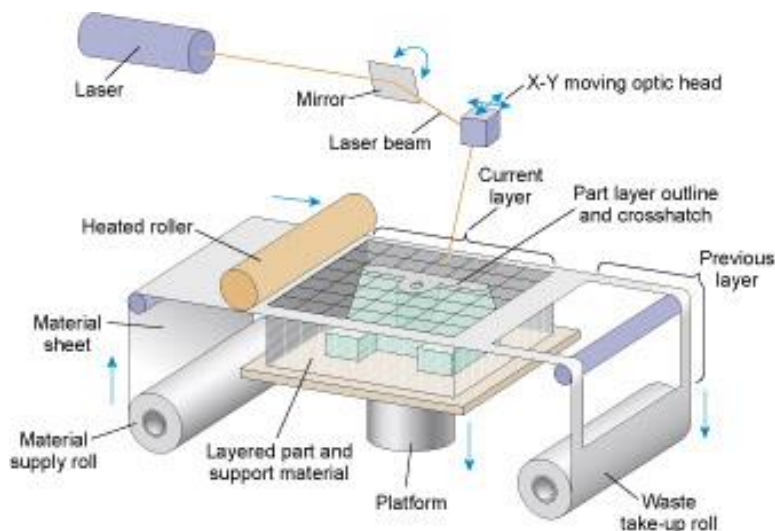


Figura 3.9 Esquema del procés de fabricació per superposició de làmines [25].

En termes de resolució i nivell de detall, venen determinats per la precisió del control del raig làser juntament amb el diàmetre del feix. En aquests últims anys, les màquines utilitzades poden assolir resolucions aproximades d'uns 50 µm en termes de gruix de capa i precisió del control [26].

3.3.4. Fusió en llit de pols (*Powder Bed Fusion*)

La fusió en llit de pols va ser patentada l'any 1979 i comercialitzada en els anys 90, pocs anys més tard de la comercialització de la estereolitografia.

Aquesta família de processos es basa en la fusió selectiva de material en pols, comunament niló o una gamma de metalls, en un llit de pols. En aquesta tecnologia d'impressió, les peces s'obtenen per sinterització. La sinterització és un cicle tèrmic que consisteix en escalfar partícules fines de material compactades durant un temps determinat a una temperatura inferior al punt de fusió del metall base. L'elevada temperatura provoca la soldadura de les partícules entre si. Aquesta fusió pot ser executada per diferents fonts d'energia. La font més comú per a dur a terme la sinterització és el làser [27]. En el cas de treballar amb materials plàstics, la tecnologia és coneguda com SLS (*Selective Laser Sintering*) i en cas de treballar

amb pols metàl·liques rep el nom de SLM (*Selective Laser Melting*).

El procés es basa en l'ús d'una plataforma de construcció que conté material en pols. En aquest procés s'utilitza un raig generalment làser per a fondre selectivament i sinteritzar partícules en punts específics. Una vegada que es completa una capa de l'objecte, la plataforma descendeix i s'afegeix més pols (Figura 3.10).

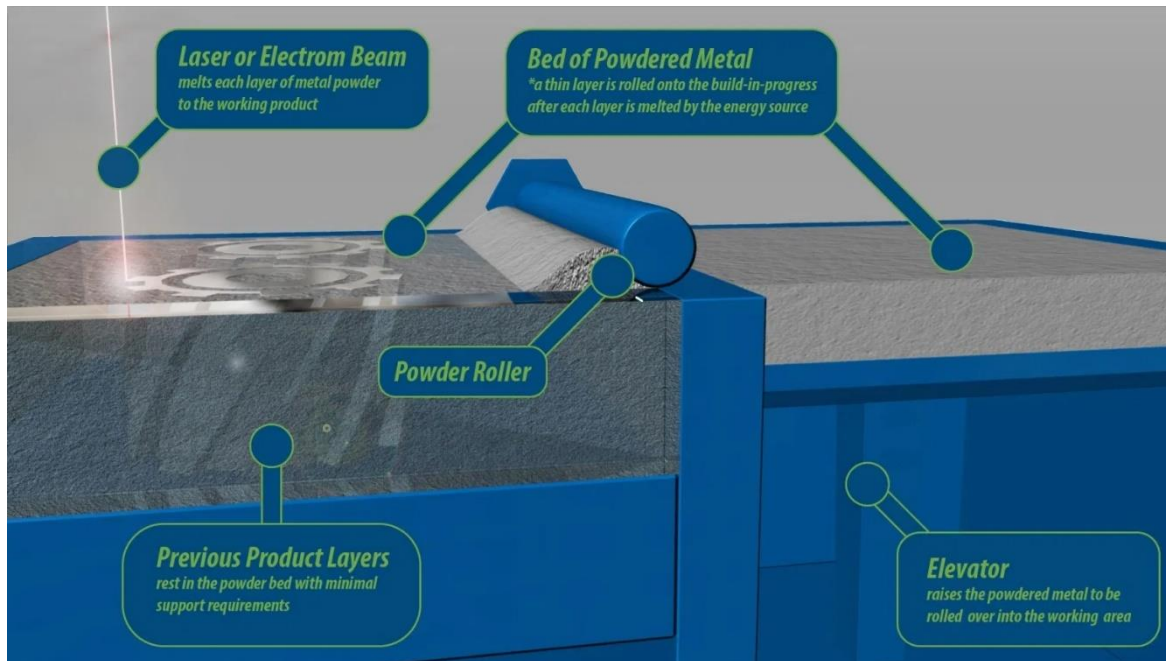


Figura 3.10 Esquema del procés de fabricació per llit de pols [28].

El procés comença de nou i es repeteix fins que es completa l'estructura 3D. Finalment, es requereix un post-processat per tal d'eliminar tota la pols restant que no ha estat sinteritzada. Aquesta pols no lligada és de gran utilitat durant el procés ja que suporta l'estructura durant la impressió, per la qual cosa no hi ha necessitat d'estructures de suport [27][27]. Per contra, la pols no sinteritzada pot ser difícil d'eliminar, especialment en geometries complexes.

La fusió en llit de pols és excepcional per a produir volades i superfícies que miren cap avall. En el costat negatiu, les altes temperatures creades per la font d'energia introdueixen una gran quantitat de calor en la peça que pot causar deformacions o concentracions de tensió indesitjables. A vegades, les peces han d'orientar-se de forma contra-intuïtiva durant la fase de fabricació per a reduir la concentració de calor [29]. Les peces produïdes tendeixen a ser resistents i amb un cert grau d'anisotropia, amb un acabat superficial granulat. Aquest acabat superficial es pot tractar mitjançant tècniques de post-processat com el poliment.

En aquest procés el gruix de la capa ve condicionat per la mida de les partícules que acostuma a ser d'entre 80 i 120 μm i la resolució depèn del gruix de la capa i del diàmetre del feix làser. Segons Starkweather [30] és tècnicament possible assolir resolucions de fins 244.000 elements per mm^2 , però a la pràctica segons [26] les resolucions que s'obtenen són de 211 elements per mm^2 .

3.3.5. Projectió d'aglomerant (*Binder Jetting*)

La tecnologia Binder Jetting va ser inventada durant un projecte del MIT en 1993. A causa de la qualitat dels resultats, l'empresa americana *Z Corporation* la va adquirir dos anys més tard, adquirint tots els drets d'aquesta tecnologia [31]. Anys més tard aquesta corporació va ser adquirida per un dels gegants més coneguts de la indústria, 3D Systems.

La projecció d'aglomerant es basa en dipositar de manera selectiva un líquid amb propietats adhesives que permet la unió del material constituït de la peça. Aquest material es troba en forma de pols a la superfície de construcció [32]. Els materials que es solidifiquen gracies al aglomerant solen ser el guix, metalls o polímers granulats.

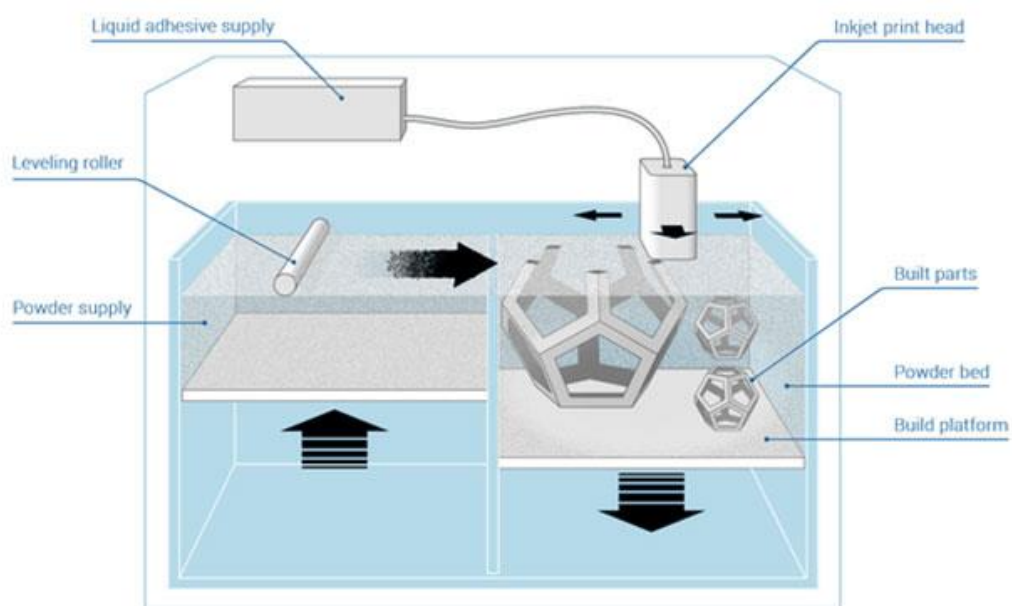


Figura 3.11 Esquema del procés de fabricació per projecció d'aglomerant [31]

Tal i com es pot veure a la Figura 4.11, el procés de fabricació és molt similar al utilitzat a la fusió en llit de pols. Un cop modelat l'objecte mitjançant un programari CAD, el primer pas és enviar-lo a la impressora 3D. Una impressora 3D Binder Jet normalment es compon de dos tancs i una plataforma d'impressió. Al principi del procés d'impressió, un dels tancs està buit, mentre que l'altre conté el material d'impressió en pols [32][33]. Un corró s'encarrega d'anivellar la pols i estén la capa de pols sobre la plataforma. Posteriorment, un capçal

polvoritza l'aglomerant convertint-la en gotetes de mida micromètrica. Cal repetir el procediment fins a obtenir la peça desitjada. Un factor interessant és la possibilitat d'imprimir en color utilitzant aquesta tecnologia. Per exemple, en el cas de la ceràmica, el color s'afegeix al mateix temps que l'aglutinant. A mesura que l'aglutinant i el color s'afegeixen a les successives capes de pols, la peça es forma a tot color [34].

Un cop impresa la peça, cal realitzar un post-processat. Aquest consisteix en eliminar tota aquella pols que no s'ha solidificat mitjançant aire comprimit i posteriorment un procés de curt per tal d'augmentar la seva resistència i potenciar els colors.

3.3.6. Projectió de material (*Material Jetting*)

Una altra de les tecnologies d'impressió 3D disponible en el mercat és la injecció de material (o *Material Jetting*). És sovint comparada amb el procés d'impressió a tinta en 2D. En aquesta tecnologia s'utilitzen foto polímers o petites gotes de cera. Després són curades exposades a una font de llum, per a anar construint la peça capa a capa [35].

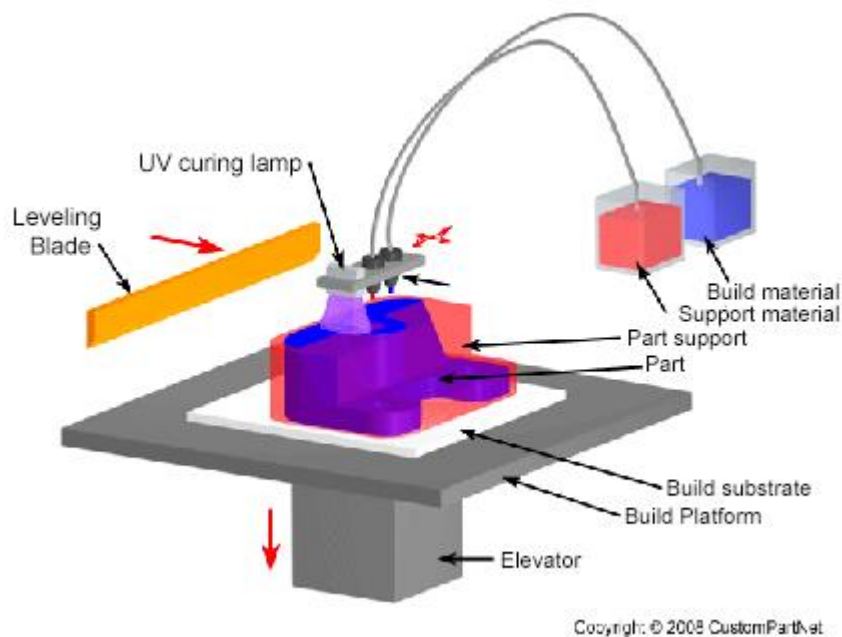


Figura 3.12 Esquema del procés de fabricació per projecció de material [36].

A causa de la naturalesa d'aquesta tecnologia, podem imprimir amb diferents materials en una mateixa peça. S'utilitza normalment per a construir suports a l'hora de fabricar peces complexes.

En realitat la injecció de material és molt semblant a la impressió amb tinta. Simplement

després de cada capa, es cura el material i la plataforma de construcció baixa una altura de capa per a repetir el procés de nou. El procés és molt ràpid, podent-se dipositar diferents tipus de material en una sola passada lineal [35][36]. Això deriva en la creació de peces en 3D més ràpidament, en comparació amb altres mètodes d'impressió.

3.3.7. Disposició directa d'energia (*Direct Energy Deposition*)

La disposició directa d'energia (DED) és un procés d'impressió 3D més complex, que s'utilitza normalment per a reparar o afegir material addicional als components existents. És completament possible fabricar peces des de zero utilitzant aquesta tecnologia, però sovint s'utilitza per a aplicacions industrials com la reparació de pales de turbines o hèlixs que han estat danyades [37]. També s'utilitza per a la fabricació de peces de superaleacions d'alt rendiment [38].

Aquest mètode utilitza una font d'energia, ja sigui un làser o un feix d'electrons, que per tal de tenir un bon control dimensional i la possibilitat de realitzar formes complexes, sol estar muntada en un braç multiaxial amb cinc graus de llibertat. El material és dipositat directament a l'extrem d'aquesta font d'energia que incideix directament en una regió petita de la superfície. En aquesta petita regió, a l'hora que es diposita selectivament el material (ja sigui pols o filferro), és fos de manera simultània mitjançant l'energia tèrmica aportada per la font d'energia. Posteriorment, el substrat fos se solidifica un cop ha avançat el làser o el feix d'electrons [37][38][39]. Aquest procés es repeteix fins que s'ha creat o reparat l'objecte desitjat i les diverses capes s'han solidificat correctament.

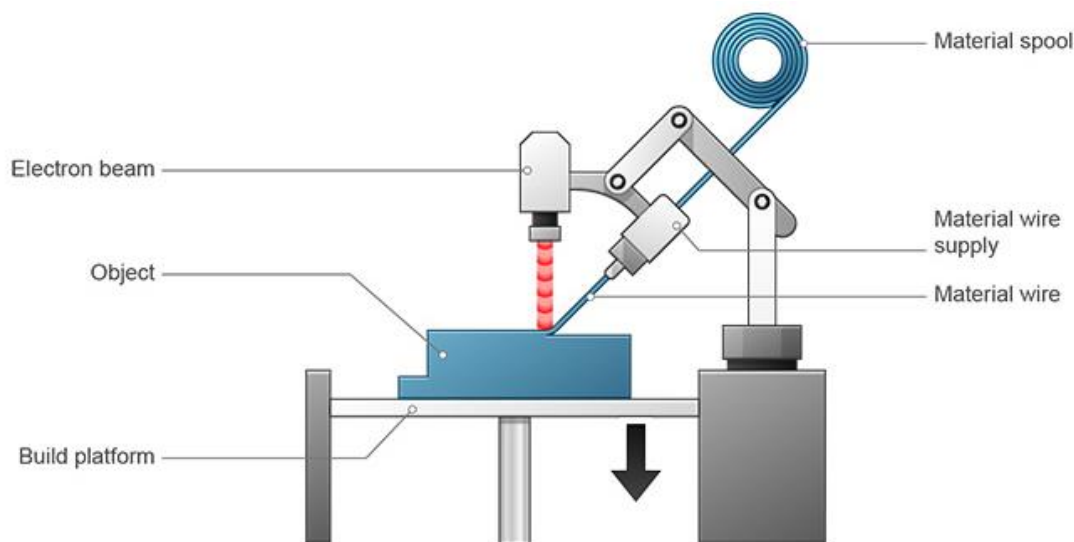


Figura 3.13 Esquema del procés de fabricació per projecció de material [39].

3.4. Fabricació per Filament Fos (FFF)

El FFF (*Fused Filament Fabrication*) o FDM (*Fused Deposition Modeling*), és un procés de fabricació additiu que pertany a la família de l'extrusió de materials. En FFF, un objecte es construeix dipositant selectivament el material fos en un camí predeterminat capa per capa. Els materials utilitzats són polímers termoplàstics i es presenten en forma de filaments.

FFF és la tecnologia d'impressió en 3D més utilitzada: representa la major base instal·lada d'impressores 3D del món i és sovint la primera tecnologia a la qual s'exposa la gent.

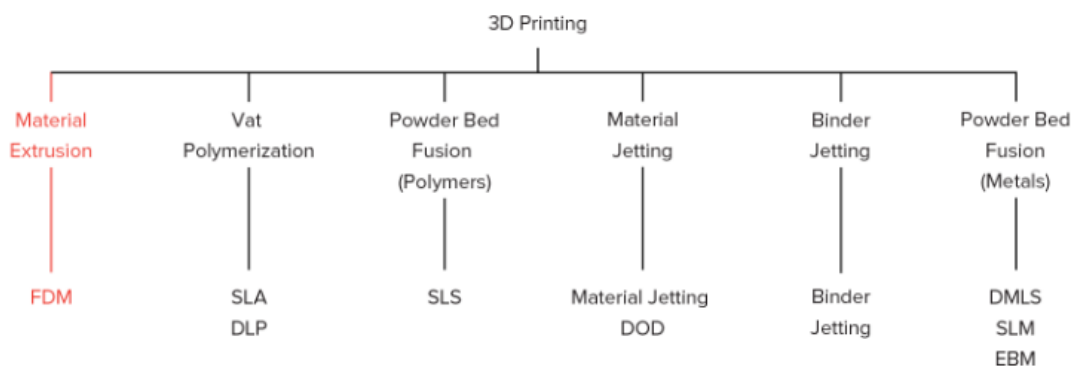


Figura 3.14 Esquema de les diferents tecnologies de 3D Printing [40].

3.4.1. Descripció del procés d'impressió FFF

El procés general de la fabricació additiva FFF, es pot definir amb tres fases diferenciades. La primera fase és la de processat previ, a continuació hi ha la fase de producció i finalment un post-processat.

- **Processat previ**

En aquesta primera fase, es necessària la creació d'un model CAD del disseny de l'objecte en tres dimensions. Existeixen multitud de programes on es pot dur a terme el model de la figura desitjada en 3D, com ara Catia, AutoCAD, etc. També existeix la possibilitat d'extreure el model CAD partint d'un model físic; aquest procés s'anomena enginyeria inversa. Aquest procediment es duu a terme gràcies al escanejat de la peça física. L'escàner extreu un núvol de punts que els programes de CAD interpreten i extreuen el model en aquesta mateixa versió.

Un cop creat el model de la peça final en versió CAD, cal exportar la geometria a format .STL, on la geometria desitjada s'ajusta mitjançant una malla tancada de triangles. El fet de que siguin triangles no és a l'atzar, es realitza així ja que qualsevol

pla a l'espai es pot definir amb tres punts. Com a conseqüència, com a més petits siguin els triangles, millor resolució tindrà la peça final. Aquest fet comporta també un creixement significatiu en el pes final de l'arxiu, així com en la potència computacional requerida per treballar amb ell.



Figura 3.15 Esquema de les diferents tecnologies de 3D Printing [41].

Un cop tenim el model STL definit, cal introduir-lo al software específic de la impressora tridimensional. Generalment, depenent de la marca utilitzada el software pot variar. Al introduir l'arxiu s'han de definir paràmetres de la impressió com poden ser la resolució o els punts de suport i un cop analitzats pel software, aquest decidirà la millor manera d'imprimir el model.

Quan tots els paràmetres estan definits, la peça ja està a punt per començar a ser impresa.

- **Producció**

Aquesta etapa engloba totes les operacions de la màquina de fabricació additiva des de l'inici de la impressió fins un cop acabada la peça. Durant aquesta etapa de producció, l'extrusor de la impressora 3D escalfa el material termoplàstic fins que aconsegueix un estat semilíquid i el diposita en gotes ultrafines al llarg de la trajectòria d'extrusió. Per poder obtenir la geometria desitjada, el capçal i/o la plataforma es mouen durant l'extrusió del material. Aquest procés es va repetint a mesura que es van adherint les capes.

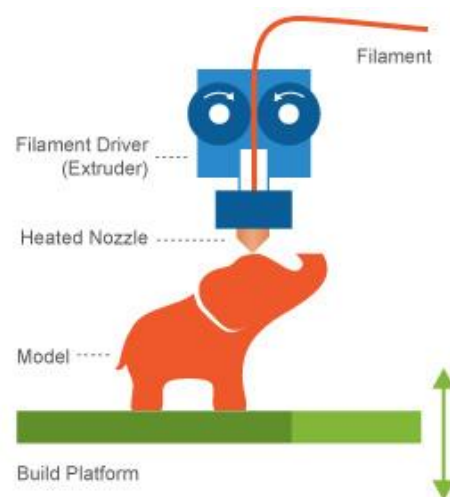


Figura 3.16 Esquema del funcionament de la tecnologia FFF [42].

- **Post-processat**

Un cop la impressora ha acabat d'imprimir la peça es poden dur a terme, si fossin necessaris, processos de post-processat. Els més comuns són l'eliminació del material de suport, millora de l'acabat superficial, tractament tèrmic, etc.

3.4.2. La implementació del doble extrusor independent en la FFF

Un dels desenvolupaments més recents i que més valor afegit han aportat a la tecnologia FFF és l'ús de dos extrusors de manera simultània. Coneguda també com IDEX (*Independent Dual Extruders*), és la tècnica d'impressió 3D que permet que dos capçals d'impressió es moguin independentment un de l'altre. Cada capçal té el seu propi filtre i pot imprimir amb un material diferent a cada capçal.

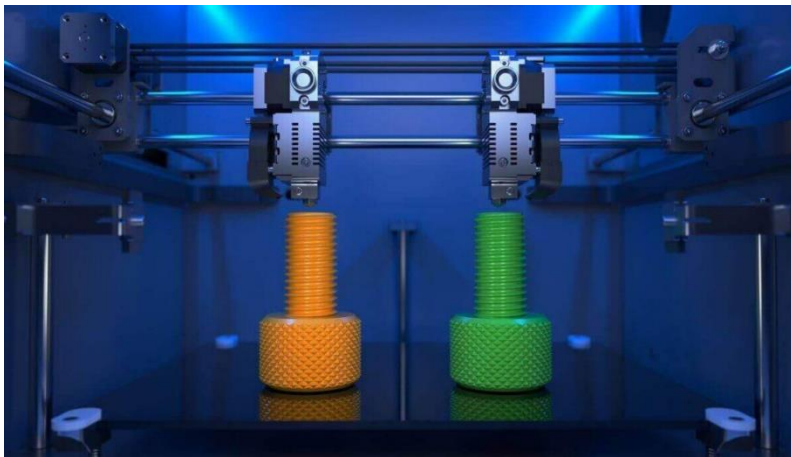


Figura 3.17 Impressora 3D amb dos extrusors independents [41].

Aquesta tecnologia comporta una sèrie d'avantatges en comparació amb l'ús d'un sol capçal amb dos extrusors en paral·lel:

- ❖ **Possibilitat d'utilitzar materials amb temperatures de fusió molt diferents.**

Atès que els capçals estan separats entre si, és possible ajustar els filtres a diferents temperatures amb una gran diferència de temperatura entre elles. Això permet a l'usuari fer moltes més combinacions de materials. Per exemple, és possible realitzar impressions complexes utilitzant un suport soluble per eliminar-lo posteriorment.

En canvi, si utilitzéssim dos extrusors en paral·lel, al compartir escalfadors caldria que els dos materials tinguessin temperatures de fusió pràcticament iguals. D'aquesta manera tenim moltes més possibilitats de poder combinar materials, no només variant el color sinó també les seves propietats.

❖ **Elimina la contaminació deguda a materials.**

Donat que cada extrusor funciona de manera independent, no hi ha contaminació creuada entre els materials ja que l'extrusor que no es troba actiu s'allunya per evitar contaminar la peça [48][49]. En el cas de tenir-los en paral·lel, al estar físicament units; la boqueta que no es troba imprimint pot deixar caure plàstic fos a la peça deixant-la contaminada.

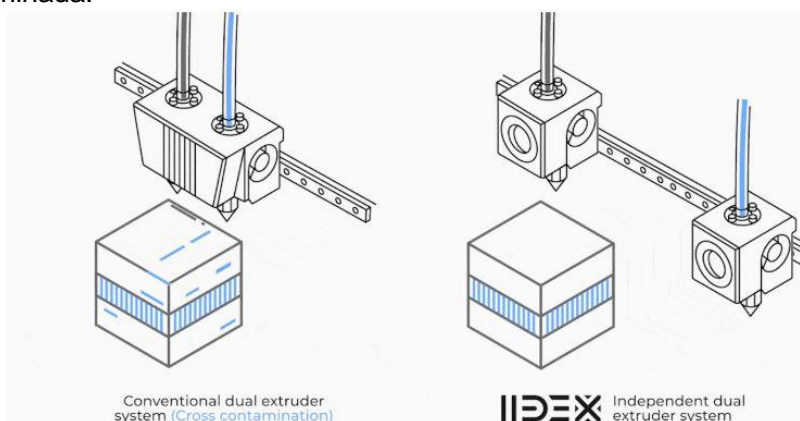


Figura 3.18 Comparació entre l'ús de un doble extrusor convencional i un d'independent en termes de contaminació de la mostra [44].

❖ **Permet duplicar la producció.**

Al disposar de dos capçals totalment independents entre sí, es poden programar per tal de que tots dos imprimeixin el mateix model a l'hora. Aquest fet comporta de manera indirecta una sèrie de beneficis [49]:

- Redueix a la meitat el cost de maquinària.
- Redueix a la meitat el cost de manteniment i el temps d'inactivitat.
- Redueix el cost de mà d'obra a la meitat.
- En el mateix espai permet realitzar el doble de peces.

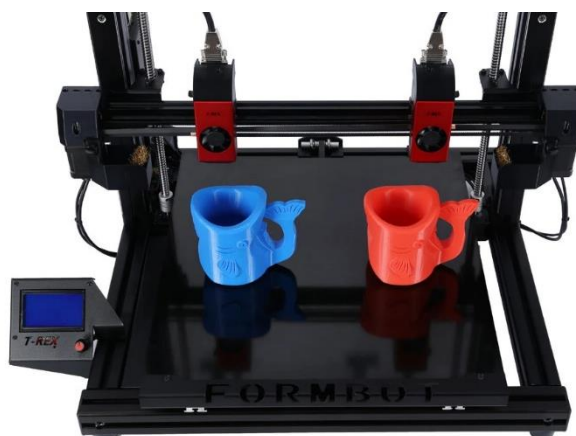


Figura 3.19 Impressora 3D imprimint dues peces iguals a l'hora [45].

❖ **Permet realitzar impressions simètriques de manera simultània.**

Tal i com es pot veure a la Figura 3.20, el fet de disposar dos extrusors independents ens permet també poder imprimir de manera simultània peces simètriques de manera molt senzilla.

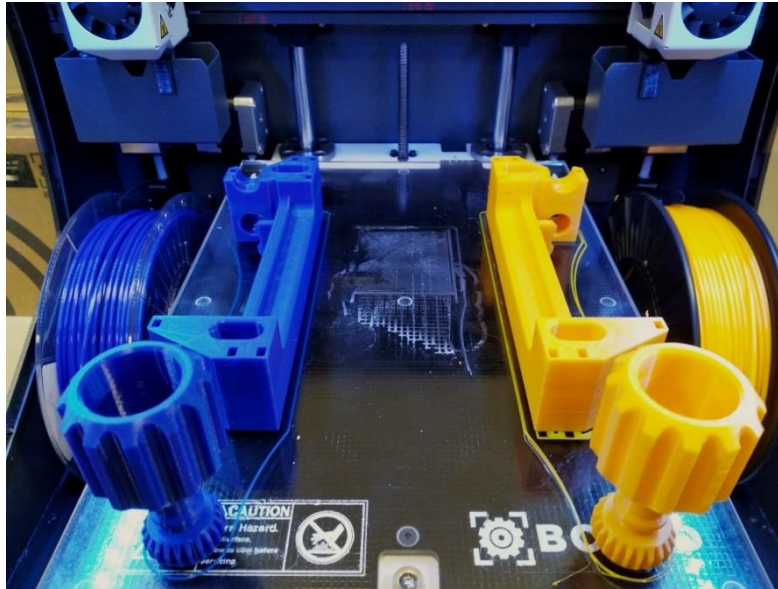


Figura 3.20 Impressió de peces amb efecte mirall [46].

❖ **Permet realitzar geometries molt més complexes utilitzant materials de suport.**

La possibilitat de poder imprimir un suport a l'hora que s'imprimeix el cos de la peça, obre un ventall molt ampli de geometries complexes, les quals, amb un extrusor convencional serien impossibles de realitzar [47]. Tal i com es veu a la Figura 3.21, sense l'ús de capçals independents la impressió de voladissos no és viable.

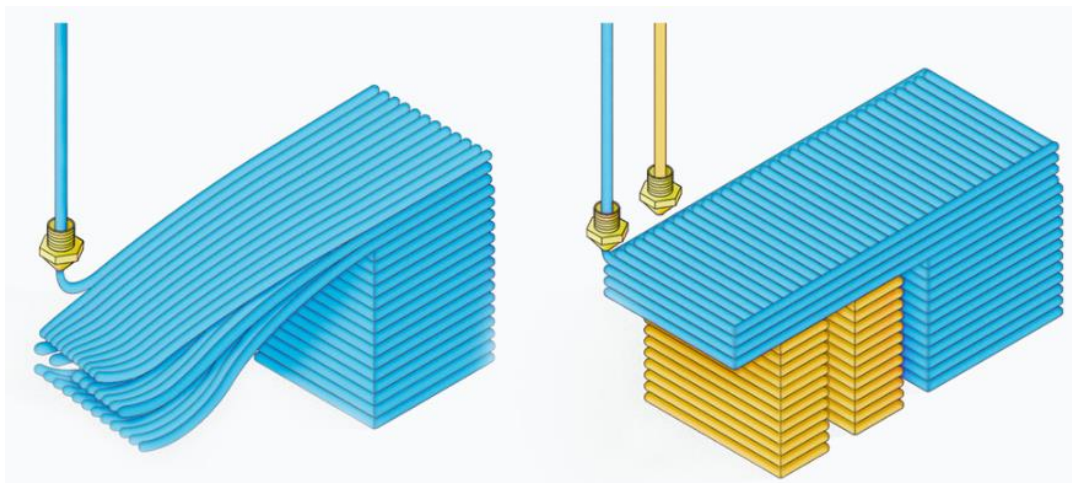


Figura 3.21 Impressió de peces amb voladís [47]

3.4.3. Paràmetres d'impressió rellevants en la tecnologia FFF

La majoria dels sistemes FFF permeten ajustar diversos paràmetres del procés. Els més importants estan relacionats amb la temperatura, la velocitat i disposició del material. A continuació s'exposen els paràmetres més influents:

- **Alçada de capa**

L'alçada de capa és un paràmetre implícit de tots els processos d'impressió 3D ja que les geometries es generen en el pla XY i posteriorment es van afegint capes a l'eix Z. Aquestes capes que es van afegint una rere l'altre, posseeixen una alçada que pot ser modificada mitjançant el software d'impressió [50]. L'alçada més utilitzada en la tecnologia FFF sol estar entre 50 i 400 μm .

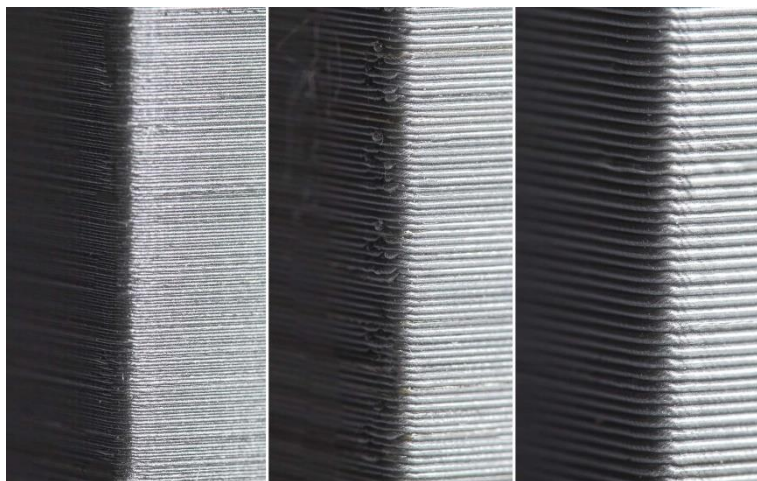


Figura 3.22 Vista d'alçades de capa de 50, 200 i 300 micres (d'esquerra a dreta) [50].

L'alçada de capa en la tecnologia FFF pot tenir un cert impacte en el temps d'impressió, el cost, l'acabat i les propietats mecàniques de la peça. Per aquests motius, si una peça posseeix superfícies corbades o l'acabat superficial és important, es recomana utilitzar una altura de capa petita. Per altre banda, si el que es busca és una impressió més econòmica i ràpida amb millors propietats mecàniques, resulta més adient utilitzar una altura alta.

- **Densitat d'infill**

Una de les característiques més significatives de la impressió 3D és la possibilitat de poder crear peces de manera ràpida i sense consumir molt material. Per aquest motiu, la gran majoria de les peces impreses mitjançant FFF no solen ser sòlides. Imprimir una peça sòlida comportaria un gran consum de material i un temps d'impressió molt elevat, resultant en un augment notable del cost.

Per tal de determinar el percentatge de material que contindrà la peça final, es defineix el paràmetre anomenat densitat d'infill. Aquest paràmetre es defineix com el percentatge de material que està confinat a l'interior de les parets de la peça 3D.

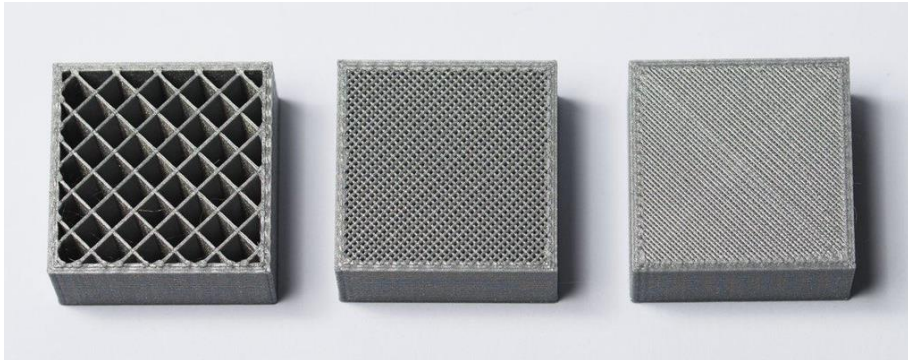


Figura 3.23 Vista de mostres amb diferent densitat d'infill [51].

Generalment, els valors de densitat d'infill més comuns estan entre el 20% i el 25%. Això ofereix un bon equilibri entre la durabilitat i el consum de materials. Si l'estructura no és una preocupació però el cost sí, el millor rang de densitat d'infill estaria entre el 10 i el 15%. Si per contra, volem realitzar peces amb unes condicions de servei exigents, caldrà utilitzar una densitat al voltant del 50% per tal de que poder fer front sense problema als requeriments mecànics.

- **Gruix de paret**

El gruix de paret és la distància entre una superfície del model i la oposada en la zona interna. A l'hora d'estalviar material, un dels punts que es sol reduir és el gruix de paret. Reduir en excés aquest paràmetre genera gran part dels problemes d'impressió.

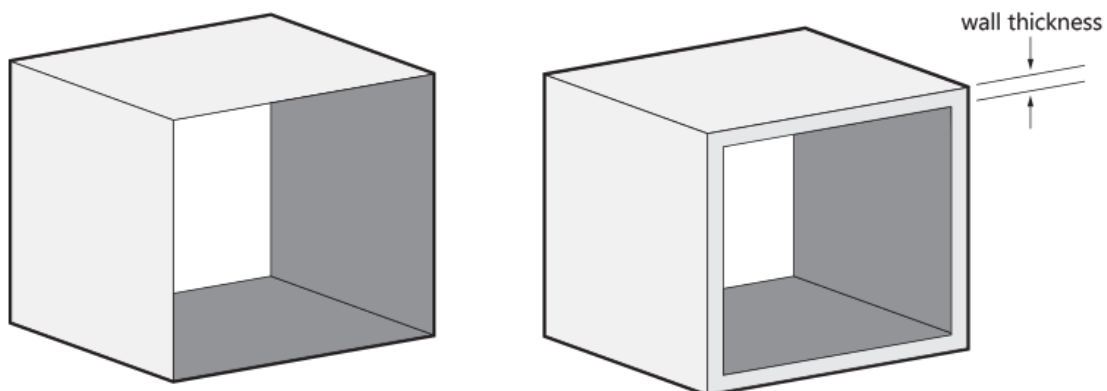


Figura 3.24 Representació del gruix de paret [52].

El valor de gruix mínim depèn de diversos factors com pot ser la mida de la peça o a seva geometria. A nivell físic, el factor principal i més influent és el material d'impressió escollit. A la Figura 3.25, es pot veure el gruix recomanat per cada material i el gruix mínim per sota del qual la impressió pot patir problemes.

MATERIAL THICKNESS RECOMMENDATIONS								
MATERIAL	PLA	ABS	NYLON	VEROWHITE	TRANSPARENT	ABS-LIKE	RUBBER-LIKE	VISICLEAR
RECOMMENDED Minimum thickness (mm)	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0
ABSOLUTE Minimum thickness (mm)	0.8	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6

Figura 3.25 Valors del gruix de paret per cada material [53].

• Patró del infill

Un altre paràmetre rellevant és el que fa referència al patró amb el qual s'imprimeix el material. Existeixen multitud de variants, cadascuna amb els seus pros i contres. Saber quin és l'adequat depèn de la mena d'objecte que estigui planejant crear i de la resistència mecànica que requereixi. Els patrons més estandarditzats són:

- Rectangular: Aquest patró estàndard proporciona una quantitat raonable de rigidesa en totes les direccions. També és un dels patrons més fàcils d'imprimir.
- Triangular: S'utilitza quan es requereix una bona resistència en les parets o quan es volen imprimir estructures llargues i primes. No obstant això, precisa d'un temps d'impressió més elevat.
- Ondulat: Aquest tipus de patró és una bona opció per a aquelles peces que necessitin ser toves i flexibles, de manera que puguin comprimir-se. Normalment s'utilitza en peces impreses amb materials flexibles.
- Hexagonal: Patró molt utilitzat quan necessitem peces que ofereixin molt bona resistència en totes les direccions.



Figura 3.26 Exemple dels patrons més utilitzats [54].

- **Velocitat d'impressió**

La velocitat d'impressió es defineix com la velocitat a la que es mou l'extrusor mentre va dipositant el filament fos. Aquesta velocitat determina, de manera intuïtiva, el temps total d'impressió. A major velocitat d'impressió, menor serà el temps total de fabricació de la peça [55].

Un altre aspecte important que determina és el temps que te la última capa per solidificar-se. Aquest fet és de gran importància donat que una baixa velocitat d'impressió provoca que la última capa impresa tingui més temps per solidificar-se abans de depositar-hi la següent. Per tant, te una gran influència entre l'adhesió de les capes.

- **Temperatura**

El paràmetre de temperatura té una gran importància a l'hora d'imprimir. Existeixen dues temperatures a tenir en compte. La temperatura de la base on es dipositarà el material i la temperatura de la boqueta on es fondrà el material.

Respecte a la temperatura de la base; és recomanable escalfar-la si s'utilitzen certs materials amb temperatures de fusió elevades per prevenir defectes, com la deformació de les peces, al entrar en contacte amb la base degut al canvi de temperatura. Es molt recomanable escalfar la base si s'utilitza ABS per imprimir mentre que no acostuma a ser necessari si s'utilitza PLA.

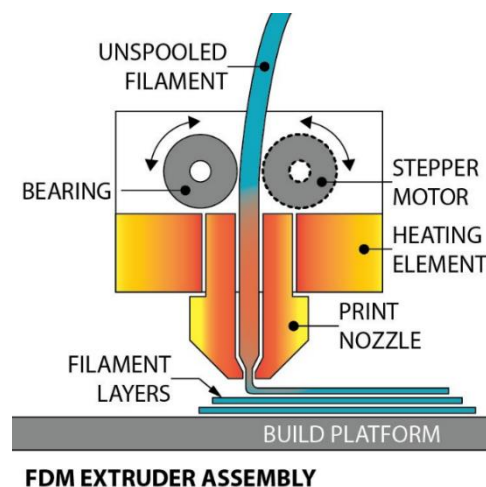


Figura 3.27 Esquema de la fusió del material [56].

Pel que fa a la temperatura de l'extrusor, aquesta depèn del filament utilitzat per imprimir i de la quantitat de material que es fa passar per la boqueta. Com més gran sigui el diàmetre de la boqueta, més material passarà pel filtre i major serà la temperatura requerida per fondre el material. Cada tipologia de material té el seu punt de fusió teòric definit no obstant, quan s'imprimeix en 3D hi ha un rang diferent de

temperatures de fusió. La fusió es produeix en el filtre i és instantània, la qual cosa sumat a la presència d'additius per a millorar l'experiència d'impressió, fa que el rang de temperatura estigui notablement per sobre del punt de fusió del material.

3.4.4. Comparació entre el FFF, el SLA i el SLS

En aquest apartat, un cop presentades totes les tecnologies, es compararà la tecnologia FFF amb dos mètodes molt utilitzats en l'entorn de la fabricació additiva. A continuació es pot veure una taula comparativa (Taula 1) de les característiques més importants de totes elles i una taula amb els principals avantatges i inconvenients (Taula 2).

Taula 1 Característiques de les impressores basades en les tecnologies FFF, SLA i SLS [57][58].

	<i>Fused Filament Fabrication (FFF)</i>	<i>Stereolithography (SLA)</i>	<i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>
Materials	Polimers termoplàstics (ABS, PLA, nylons...)	Resines fotopolimèriques	Polímer en pols
Alçada de capa	Entre 0,05 i 1,5 mm	Entre 0,05 i 0,15 mm	Entre 0,06 i 0,15 mm
Tolerància dimensional	± 200 µm	± 100 µm	± 300 µm
Preu aproximat d'una impressora de sobretaula	≈ 3000 €	≈ 4000 €	≈ 9000 €
Preu aproximat del material	Entre uns 18 – 50 €/kg	Entre uns 50 – 90 €/L (densitat ≈ 1,1 kg/L)	Entre uns 90 – 460 €/kg
Aprofitament del material	Una bobina d'un kg permet produir unes 400 peces d'escacs de mesura estàndard.	Un litre de resina produeix aproximadament 90 peces d'escacs de mesura estàndard.	Variable, depèn del material i de la màquina utilitzada.

Taula 2 Avantatges i inconvenients de les tecnologies FFF, SLA i SLS [57][58].

	<i>Fused Filament Fabrication (FFF)</i>	<i>Stereolithography (SLA)</i>	<i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>
Avantatges	a) Fàcil d'utilitzar ja que no emet gasos tòxics. b) Fàcil de netejar c) Ampli rang de materials d) Fàcil manteniment e) Equip senzill, sense mecanismes complexes. f) Bona velocitat d'impressió	a) Els elements impresos presenten un millor acabat superficial. b) Alta precisió, fet que redueix les toleràncies dimensionals.	a) No requereix de materials de suport. b) Possibilitat de poder imprimir moltes peces de manera simultània sense incrementar els temps d'impressió. c) Molt bona adhesió entre capes.
Inconvenients	a) Les propietats mecàniques de la peça poden variar degut a la orientació, la densitat d'impressió o la resolució. b) Per obtenir bons acabats superficials, calen làmines més primes i temps d'impressió més elevats.	a) Les resines i dissolvents contenen elements tòxics i perillosos pel medi ambient. b) Requereix un espai aïllat per tal d'evitar contaminacions. c) Les zones fines són molt fràgils.	a) La matèria prima es troba en pols que al ser inhalada pot ser perillosa per la salut. b) Tecnologia econòmica únicament si la producció es molt gran. Le impressores individuals no són rentables. c) Las impressions requereixen un temps de refredament de fins a 12 hores.

Analitzant les taules es pot apreciar que la tecnologia FFF és la ideal per realitzar elements de prototipatge ràpid que no necessitin una alta precisió i un molt bon acabat superficial. Ens permet també, produir molts elements a un baix cost i sense emetre residus tòxics, fets que la fan ideal per utilitzar-la en qualsevol espai sense necessitat de tenir unes instal·lacions condicionades.

D'altra banda, la tecnologia SLA està més enfocada en l'àmbit industrial. És ideal per produir grans sèries amb un alt nivell de detall. També permet produir motlles de gran definició per la posterior producció en sèrie. En contrapartida, les impressores SLA necessiten un recinte controlat ja que la matèria prima conté substàncies que poden ser tòxiques i perilloses pel medi ambient.

Finalment, la tecnologia SLS es troba també totalment enfocada en l'àmbit industrial, ja que en un àmbit més recreatiu no seria rentable. És altament útil a l'hora de crear dissenys molt complexos i amb cert nivell de detall tot i que la producció és baixa deguda a la seva baixa velocitat d'impressió.

3.5. Impressora Sigma de BCN3D Technologies

La impressora utilitzada per aquest Treball Final de Màster ha estat la BCN3D Sigma R19 (BCN3D Technologies, Barcelona, Espanya) proporcionada per la fundació CIM UPC.

3.5.1. Descripció i propietats

La Sigma R19 és considerada una impressora 3D d'escriptori fàcil d'usar i amb doble extrusor independent (IDEX), que permet imprimir peces multimaterial d'alta resolució d'una manera simple i eficaç. Es basa en la tecnologia FFF i permet imprimir volums de fins a 210mm x 297mm [59].

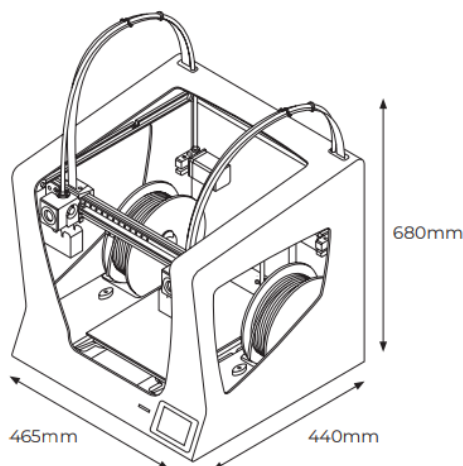


Figura 3.28 Esquemàtic de la impressora BCN3D Sigma R19 [59].

Tal i com es mostra a la Figura 3.28, les dimensions de la impressora són 465mm x 440mm x 680mm (incloent-hi els cables) i el seu pes aproximat és de 15 kg.

Respecte a l'ús de materials, la Sigma R19 pot treballar amb PLA, ABS, NYLON, TPU i composites, entre d'altres. El diàmetre dels filaments han de ser de $2,85 \pm 0,05$ mm per un

correcte funcionament [59].

3.5.2. Components principals de la impressora

La Sigma R19, de la mateixa manera que la majoria d'impressores, posseeix quatre components principals pel seu funcionament. Tot i ser els mateixos components, la qualitat d'aquests és el que marca la diferència. Els components principals de la Sigma R19 són:

- ❖ **Capçals.** El capçal es pot descriure com el component d'una impressora 3D FDM que escalfa, fon i extrueix el material capa per capa a través d'una boqueta [60]. Tota l'estructura del capçal ajuda a mantenir una temperatura de sortida constant i precisa, així com a proporcionar una dissipació tèrmica optimitzada [61]. Per aconseguir-ho, el capçal té dues parts diferenciades. La part superior s'encarrega de la dissipació tèrmica amb l'ajuda d'unes aletes. La part inferior s'anomena zona d'escalfament i és on s'escalfa el material fins la temperatura requerida. A la impressora Sigma R19, la temperatura màxima del capçal és de 290°C [60].

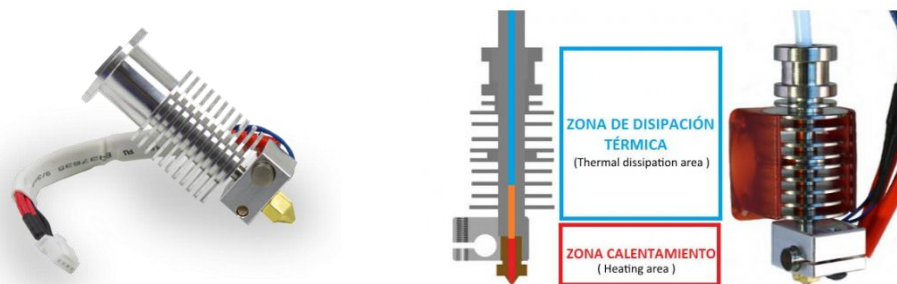


Figura 3.29 Capçal e3D utilitzat a la impressora Sigma R19 [61].

- ❖ **Extrusor:** La funció principal de l'extrusor és moure el filament del rodet al capçal de la manera més precisa i a la velocitat adequada per a la impressió en 3D. En el cas de la impressora Sigma, incorpora dos extrusors de la marca Bondtech™. Aquests extrusors contenen un sistema de doble engranatge que ofereix un major control, un rendiment superior i un nivell de detall més depurat independentment de la mena de fil utilitzat [60][62].

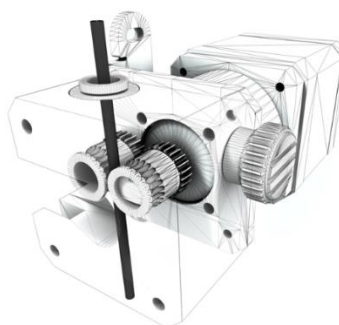


Figura 3.30 Esquemàtic d'un extrusor Bondtech™ [63].

- ❖ **Base o llit calefactable:** L'objectiu principal és mantenir una temperatura perquè la impressió es mantingui adherida i no es desenganxi degut a les forces que generen al anar dipositant cada capa. A més a més, evitarà la deformació deguda al xoc tèrmic al refredar-se la peça (warping) [64]. La temperatura màxima que pot assolir el llit calefactable de la Sigma R19 és de 100°C.
- ❖ **Sensor de fi de filament:** La funció del sensor de detecció de fi de filament és detectar quan s'ha acabat el filament, aturant el procés d'impressió.

3.6. Materials

El gran desenvolupament de la tecnologia de fabricació additiva ha permès, que actualment es puguin utilitzar multitud de materials diferents. Aquests materials es poden agrupar en tres grans grups:

- ❖ **Materials polimèrics i compòsits:** La família dels materials polimèrics és la primera que va ser utilitzada en la fabricació additiva i la més empleada actualment. La gran varietat de propietats que tenen els polímers han permès que aquests s'adaptin amb gran facilitat a les diferents tecnologies d'impressió. Els polímers utilitzats per a la fabricació additiva es poden trobar en diferents formes tals com filaments termoplàstics, pols o resines. Els més utilitzats, entre d'altres, són el Acrilonitril butadiè estirè (ABS), l'àcid polilàctic (PLA), el politereftalat d'etilè (PE) i el policarbonat (PC) [65]. Els elements impresos amb materials polimèrics i compòsits tenen multitud d'aplicacions en pràcticament tots els sectors; cal destacar el sector aeroespacial, fabricació de joguines, el arquitectònic o en sectors on es necessiti prototipatge. És precisament en aquest últim àmbit on els beneficis de poder dissenyar amb molt detall de manera ràpida i a baix cost prenen major rellevància ja que no es necessita que la peça tingui unes bones propietats mecàniques [65]. A més a més, aquest procés pot ser més rendible que altres mètodes tradicionals, com el modelatge i l'extrusió per a productes personalitzats.

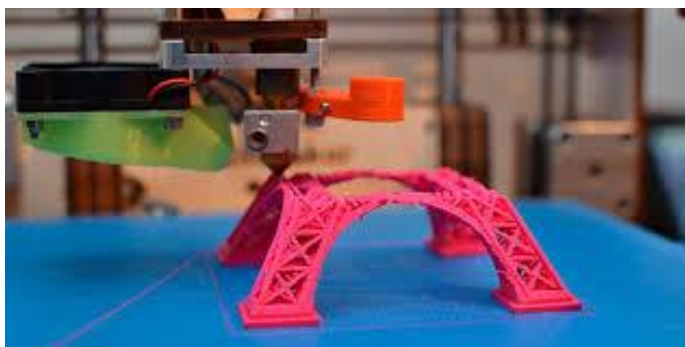


Figura 3.31 Impressió 3D d'una maqueta utilitzant ABS [66].

Per a millorar les propietats mecàniques que presenten les peces polimèriques impreses via 3D s'estan estudiant mètodes [66][67], per tal de treballar amb compòsits que aportaran un millor comportament mecànic. Alguns d'aquests compòsits amb base polimèrica ja s'estan utilitzant a l'actualitat com pot ser el cas de la fibra de carboni utilitzada en la producció de cotxes de competició.

- ❖ **Materials metàl·lics:** Aquesta família de materials, els quals no tenen propietats tant idònies com els polímers, han estat optimitzats per tal de poder ser utilitzats a la fabricació additiva. El titani i els seus aliatges, els aliatges d'acer, alguns aliatges d'alumini, aliatges de níquel i alguns aliatges de cobalt i magnesi poden ser alguns exemples.

Aquesta optimització és conseqüència directa dels alts costos de mecanitzat i llargs terminis de lliurament que pateixen aquests materials en els sistemes de fabricació convencionals [68]. Per tant, la fabricació additiva permet produir estructures molt complexes a un cost i una pèrdua de material menor que es tradueix en un estalvi econòmic significatiu.

Els materials metàl·lics més utilitzats actualment són el titani (Ti) i els seus aliatges (Ti6Al4V) principalment en aplicacions comercials en els camps biomèdics i aeroespacial tot i que cada cop s'està expandint cap a més sectors [69][68]. Aquesta tècnica està mostrant excel·lents perspectives de creixement. Tal i com anuncia Wohlers [70][69], el nombre d'empreses que distribueixen sistemes de fabricació additiva va passar de 49 en 2014 a 97 en 2016, on el 49% de les quals distribueixen



Figura 3.32 Pròtesis de titani creada mitjançant la impressió 3D [71].

- ❖ **Materials ceràmics:** La fabricació additiva s'ha convertit en un mètode cada cop més desenvolupat per a la fabricació d'elements basats en ceràmiques. És d'especial interès en àrees on es treballen amb biomaterials, com en l'enginyeria de teixits [72]. A més a més cada cop està més propera la possibilitat de poder imprimir estructures senceres, com edificis, mitjançant la tecnologia additiva.

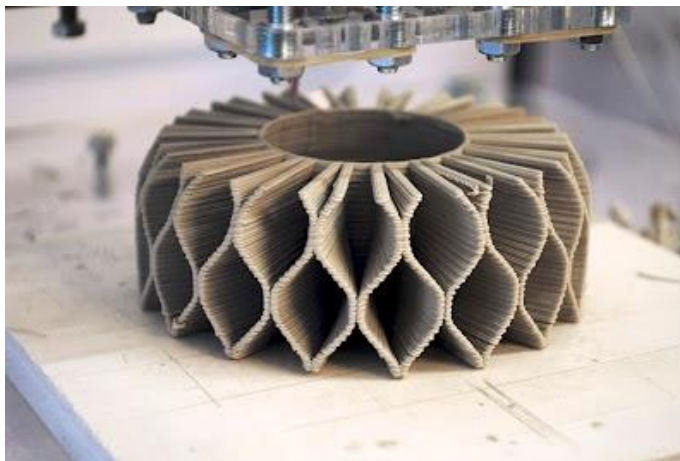


Figura 3.33 Peça decorativa de ceràmica creada mitjançant la impressió 3D [73].

L'ús d'aquests materials comporta una sèrie de reptes a l'hora de millorar la tecnologia ja existent. Malgrat que la precisió d'impressió cada cop és millor, es segueix treballant per tal de millorar la definició entre capes i en ampliar cada cop més el ventall de materials ceràmics disponibles per l'ús d'aquesta tecnologia.

3.6.1. Principals materials emprats en la impressió FFF

Els materials principals utilitzats en impressores FFF o FDM són els polímers termoplàstics. Dins d'aquest gran grup, hi ha tres polímers principals: l'acrilonitril butadiè estirè (ABS), l'àcid polilàctic (PLA) i el politereftalat d'etilè (PE) [65][65]. En aquest apartat únicament es definiran els dos primers ja que són els més utilitzats per la gran majoria d'usuaris d'impressores FFF.

3.6.1.1. ABS

L'acrilonitril butadiè estirè és un termoplàstic amorf derivat del petroli. Un termoplàstic és un plàstic que sotmès a l'exposició de temperatures relativament altes, es torna deformable o flexible arribant fins i tot a fondre's, mentre que quan es refreda prou, s'endureix [74].

Existeixen tres processos comercials a l'hora d'obtenir l'ABS, aquests són: la polimerització per emulsió, la polimerització per massa i la polimerització per suspensió-massa. La clau de tenir tres processos d'obtenció diferents radica en que les propietats del ABS resultant varien entre elles [75]. En general el procés d'emulsió s'utilitza per produir-lo amb una alta resistència a l'impacte mentre que el procés de polimerització en massa se sol utilitzar en cas de requerir

un ABS amb menor resistència.

L'estructura del ABS es una barreja d'un copolímer vítri, que el formen l'estirè i el acrilonitril, i un compost elàstic com és el butadiè. Aquesta composició crea una fase elastòmera en forma de bombolles immersa en una estructura dura i rígida de copolímer vítri.

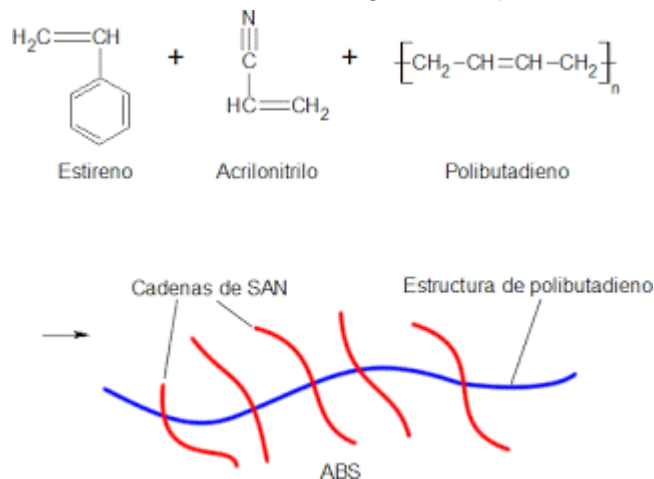


Figura 3.34 Estructura del ABS [76].

El resultat d'aquesta composició és un material amb una combinació de les propietats que aporta cada monòmer per separat. L'acrilonitril aporta una bona resistència química, una bona resistència a la fatiga i rigidesa. El butadiè, al ser un elastòmer, aporta una bona tenacitat i resistència a l'impacte. Finalment l'estirè aporta resistència a la temperatura, duresa i possibilitat d'afegir colors. En conjunt, l'ABS té les propietats fisico-químiques que es poden veure a la Taula 3.

Taula 3 Propietats del ABS [77].

Propiedades Físico – Mecánicas Physical Et Mechanical Propierties	
Alargamiento a la Rotura (%) Elongation at break (%)	45
Coefficient de Fricción Coefficient of friction	0,5
Módulo de Tracción (GPa) Tensile modulus (GPa)	2,1-2,4
Resistencia a la Tracción (MPa) Tensile strength (MPa)	41-45
Resistencia al Impacto Izod (J m ⁻¹) Izod impact strength (J m ⁻¹)	200-400
Absorción de Agua - en 24 horas (%) Water absorption - over 24 hours (%)	0.3-0.7
Densidad (g cm ⁻³) Density (g cm ⁻³)	1,05
Resistencia a la Radiación Radiation resistance	Aceptable Fair
Resistencia a los Ultra-violetas Resistance to Ultra-violet	Mala Poor

Aquestes bones propietats físico-químiques pel que fa a la resistència mecànica i la resistència a agents químics com ara àcids, fan que l'ABS sigui un dels polímers amb aplicacions més diverses. Les principals aplicacions de l'ABS són la fabricació de joguines (com ara les peces de LEGO), carcasses d'electrodomèstics, elements de l'automòbil, cascos de motocicleta, etc. Referent a la impressió 3D, l'ABS va ser el primer material en utilitzar-se de manera extensiva i comercial en les impressores RepRap [78]. Fet que el va convertir en el termoplàstic més utilitzat en la impressió 3D. Actualment, l'aparició de nous materials com el PLA, que definirem a continuació, li han fet perdre cert protagonisme.

3.6.1.2. PLA

L'àcid polilàctic (PLA) és un biopolímer termoplàstic que es basa en la molècula de l'àcid làctic. Aquesta molècula és d'origen natural i pot provenir del blat, la patata, el blat de moro o la canya de sucre. Degut a les seves propietats biodegradables, aquest polièster termoplàstic es descompon de manera gradual en molècules cada cop més simples [79]. Gràcies a aquest mecanisme, el PLA pot degradar-se de manera natural sense causar cap dany al medi ambient a diferència dels polímers sintètics com el ABS. Tanmateix, el baix impacte ambiental és sovint posat en dubte per la necessitat d'utilitzar energia generalment obtinguda de combustibles fòssils per a la seva fabricació. No obstant això, el seu procés d'obtenció requereix d'entre un 20 i un 50% menys de recursos fòssils que els polímers basats en hidrocarburs [80]. Actualment el PLA és el polímer biodegradable més utilitzat a nivell mundial i cada cop està adquirint més mercat a costa dels polímers provinents d'hidrocarburs.



Figura 3.35 Obtenció del PLA [81].

Tal i com mostra la Figura 3.35, el procés de producció del PLA es basa en primer lloc en l'obtenció de midó de matèries primeres riques en sucres. A continuació s'extreuen la dextrosa, la glucosa i la sacarosa. Posteriorment, mitjançant una reacció de condensació continua s'obté un polímer de baix pes molecular que a continuació es polimeritza i es destil·la per tal d'obtenir un polímer de PLA d'alt pes molecular, generalment en forma de pellets.

Les seves propietats mecàniques son adequades per la producció de multitud de peces ja que tots els seus valors es troben en un rang suficient per satisfer la majoria de sol·licitacions.

Taula 4 Propietats del PLA [83].

PROPIEDADES DEL PLA	
Densidad	1210 - 1250 Kg/m ³
Módulo de Young	3.45 - 3.83 GPa
Módulo de flexión [15]	2.3 – 4.9 GPa
Limite elástico	48 - 60 MPa
Resistencia a tracción	48 - 60 MPa
Resistencia a compresión	48 - 60 MPa
Elongación	5 - 7 %
Dureza Vickers	14 - 18 HV
Temperatura de fusión	160 - 177 °C
Temperatura de transición vítrea	56 - 58 °C
Temperatura máxima de servicio	70 - 80 °C

Tal i com es veu a la Taula 4, te propietats mecàniques similars als polímers d'origen petroquímic. L'únic aspecte diferencial seria la seva baixa elongació. Analitzant les seves propietats podem definir el PLA com un material rígid i fràgil, degut precisament aquesta baixa elongació, i amb una bona resistència al desgast. Visualment, el PLA és un material transparent en estat amorf i a mesura que cristal·litza cada cop es torna més opac. La temperatura que separa la fase amorfa i la fase cristal·lina, coneguda com a temperatura de transició vítria és d'uns 57°C [82]. Per tal de treballar amb el PLA com a matèria prima d'impressió, caldrà escalfar-lo per sobre de la seva temperatura de fusió: Per tant, caldrà treballar a temperatures entre 180 i 190 °C [83].

3.6.2. Comparació entre el PLA i el ABS. Avantatges i inconvenients.

Tot i que al voltant del 95% dels usuaris d'una impressora que utilitza una tecnologia FFF fan servir l'ABS o el PLA com a materials d'impressió, són materials molt diferents entre ells [84].

Per tenir una visió més global dels punts forts i febles de cada material, es realitzarà una comparació entre tots dos.

Taula 5 Comparació dels dos materials d'impressió principals [84][85].

PLA	
AVANTATGES	INCONVENIENTS
Biodegradable	Poca resistència a la humitat
No produeix gasos i no fa olor	Difícil d'unir peces mitjançant encolat
Bona resistència a la radiació ultraviolada	Es pot arribar a deformar amb la calor ja que te una temperatura de transició vítria (T_g) al voltant dels 60°C
Es pot realitzar post-processat (llimar amb paper de vidre i pintar amb acrílics)	
Més senzill d'imprimir ja que es pot imprimir sense calefactar la base	
ABS	
AVANTATGES	INCONVENIENTS
Bona resistència a la abrasió	Sensible a la radicació ultraviolada
Es pot post-processar amb acetona per tal d'obtenir un acabat brillant	Provoca gasos que fan olor i en concentracions altes poden ser perjudicials per la salut
Es pot realitzar post-processat (llimar amb paper de vidre i pintar amb acrílics)	Més complexa d'imprimir ja que requereix una temperatura més elevada i la base d'impressió calefactada
Podem utilitzar acetona com a cola per unir diverses parts	
Temperatura de fusió més elevada que permet aplicacions més exigents tèrmicament	

A l'hora d'imprimir les mostres d'aquest treball es va utilitzar el PLA ja que aporta unes millors condicions. El primer avantatge que aporta és la facilitat d'impressió ja que necessita temperatures més baixes per extruir-lo i no es necessari calefactar la base d'impressió. A més a més, el PLA és biodegradable i no emet gasos potencialment perillosos.

4. MATERIALS I MÈTODES

4.1. Disseny experimental

En el present treball fi de màster es pretén establir una relació entre una sèrie de paràmetres mitjançant una impressora BCN3D Sigma R19 (BCN3D Technologies, Barcelona, Espanya) que es basa en la tecnologia FFF, utilitzant el PLA com a material d'impressió.

Es van definir com a paràmetres d'estudi el nombre/diàmetre de capçals utilitzats per imprimir la peça, el gruix de la paret i la densitat de l'infill (Taula 6). En el cas de les peces impreses amb dos capçals, el segon capçal es va utilitzar exclusivament per imprimir l'infill de la peça. Per poder valorar els efectes, es va proposar un disseny factorial de tres factors i dos nivells (2^3) complet (Taula 7). Es van fabricar un total de vuit sèries diferents amb cinc mostres cada una resultant en un total de 40 provetes impreses.

Taula 6 Nivells alts i baixos dels factors utilitzats.

Factor	Nivell Baix	Nivell Alt
Capçal	0,4	0,4 i 0,8
Gruix de paret	1,2	1,6
Densitat d'infill	20	25

Taula 7 Disseny factorial complet de tres factors i dos nivells.

Codi	Capçal [mm]	Gruix de paret [mm]	Densitat d'infill [%]
04_A	0,4	1,2	20
04_B	0,4	1,2	25
04_C	0,4	1,6	20
04_D	0,4	1,6	25
DUAL_A	0,4 i 0,8	1,2	20
DUAL_B	0,4 i 0,8	1,2	25
DUAL_C	0,4 i 0,8	1,6	20
DUAL_D	0,4 i 0,8	1,6	25

4.2. Preparació de mostres

4.2.1. Disseny de les provetes

Per dur a terme l'estudi es van dissenyar provetes normalitzades. Després d'analitzar diversos estudis [86][87], on es va veure que les provetes dissenyades mitjançant la normativa ISO 527-2:2012 *Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion* plàstics patien fractures fora de la zona d'assaig.

Per tal de evitar aquest comportament, es van fabricar les provetes seguint la normativa ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Concretament, la ASTM D638-02a *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* [88]. Aquesta normativa presenta un disseny de proveta més robusta, amb un canvi de secció més suau i un major gruix i amplària de la proveta (Figura 4.1). Cal remarcar que aquestes normatives no inclouen consideracions particulars per a la fabricació additiva i suposen que el material és continu i homogeni, tot i que no ha de ser necessàriament isotròpic [89].

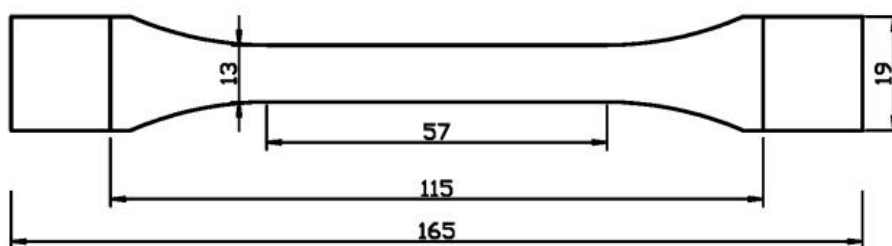


Figura 4.1 Mesures en mm de la proveta utilitzada Type I de la ASTM D638-02a amb un gruix de 7mm [90][89].

Aquests models van ser extrets en format .STL de la web *Thingiverse* i retocats posteriorment mitjançant el programa SOLIDWORKS (Release 2018. Dassault Systemes). Un cop obtingut el disseny definitiu, aquest es va introduir al programa slicer BCN3D Cura 3.2.0 que permet ajustar els paràmetres d'impressió i posteriorment generar l'arxiu de codi en format GCODE. Tant bon punt s'ha generat el fitxer, únicament cal transmetre'l a la impressora per tal de començar la impressió de les mostres.

L'estructura general de les provetes es pot veure a la Figura 4.2. Les parets superior i inferior tenien en totes les mostres un gruix d'un mil·límetre i van ser impreses amb un patró de zig-zag. El gruix de paret es va fer, bé de 1,2 mm o de 1,6 mm depenent de la sèrie i va ser impresa amb un capçal de 0,4 mm en tots els casos. L'infill es va imprimir amb un patró rectangular, utilitzant bé un capçal de 0,4 mm (per les mostres 04) o un capçal de 0,8 mm (per

les mostres DUAL).

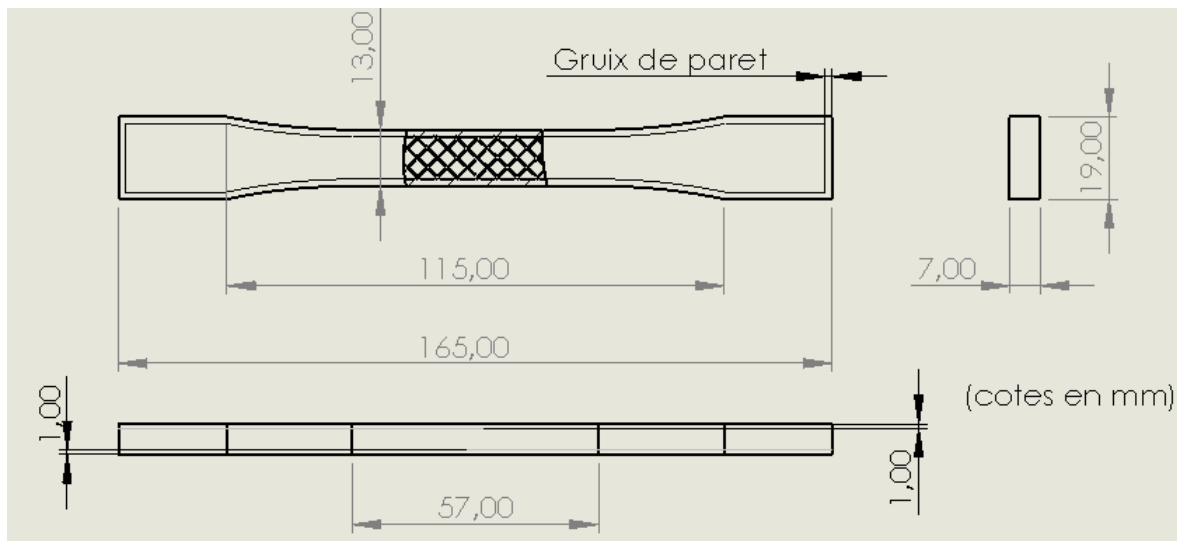


Figura 4.2 Planta, alçat i perfil de les provetes impreses.

4.2.2. Paràmetres d'impressió de les provetes

A continuació es descriuran amb més detall els diferents paràmetres estudiats i la seva variació en les diferents provetes estudiades.

4.2.2.1. Nombre de capçals d'impressió

El primer paràmetre variat van ser els capçals utilitzats per la impressió de les mostres. Es van utilitzar dues configuracions diferents. La primera, utilitzava un capçal de 0,4 mm per imprimir tota la peça; tant les parets com l'infill (Figura 4.3a). La segona, utilitzava un capçal de 0,4 mm per imprimir les parets exteriors i un de 0,8 mm per l'infill (Figura 4.3b). La part impresa amb un capçal de 0,8 mm es va fer utilitzant PLA de color vermell i la de 0,4 mm PLA de color gris. Naturalment, el fet d'utilitzar un capçal de diàmetre més gran, a igual percentatge d'infill, influeix en la morfologia de l'infill, reduint el nombre de filaments i augmentant la seva separació. A la Figura 4.3 es pot veure la diferencia entre la morfologia interna de la peça en les dues sèries de mostres.

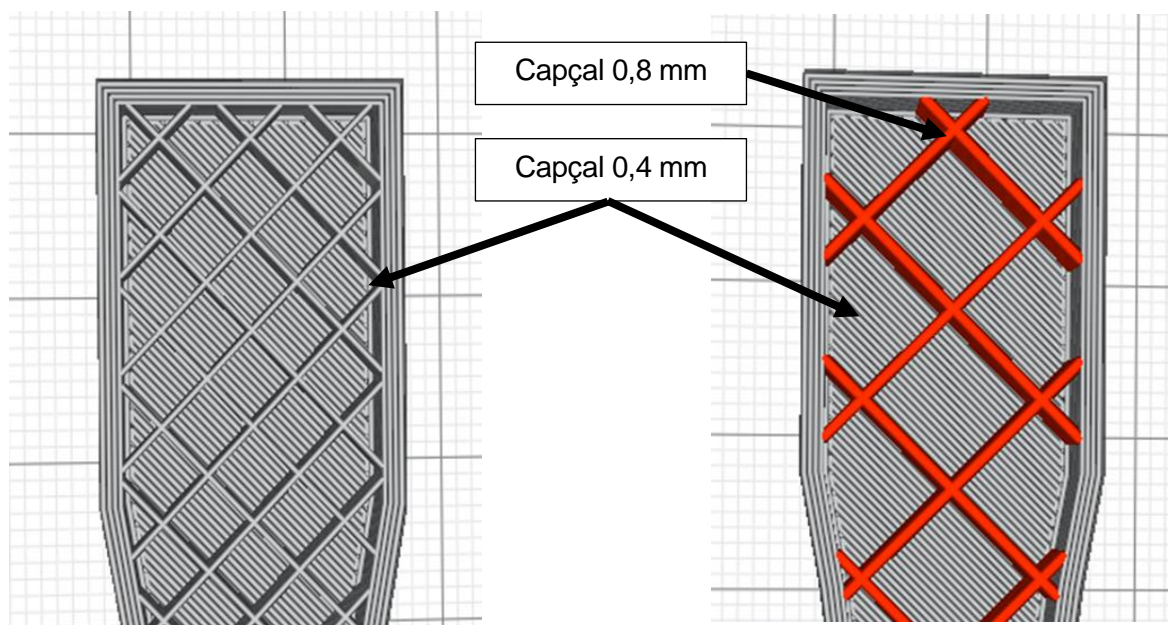


Figura 4.3 Estructura de les provetes a) Tota impresa amb un capçal de 0,4 mm; b) Contorns impresos amb un capçal de 0,4 mm i l'infill amb un de 0,8 mm.

4.2.2.2. Gruix de paret

El segon paràmetre que s'ha modificat correspon al gruix que té la paret lateral de la mostra. Els valors utilitzats han estat 1,2 mm i 1,6 mm. A la Figura 4.4 es pot veure la diferència entre els gruixos. De color vermell es representa la capa de paret exterior i en verd les capes interiors. En estar impreses amb un capçal de 0,4 mm, es pot apreciar que sumant les capes interiors i exteriors, s'obté el gruix total de la paret; 1,2 mm en el cas a) i 1,6 mm en la imatge b).

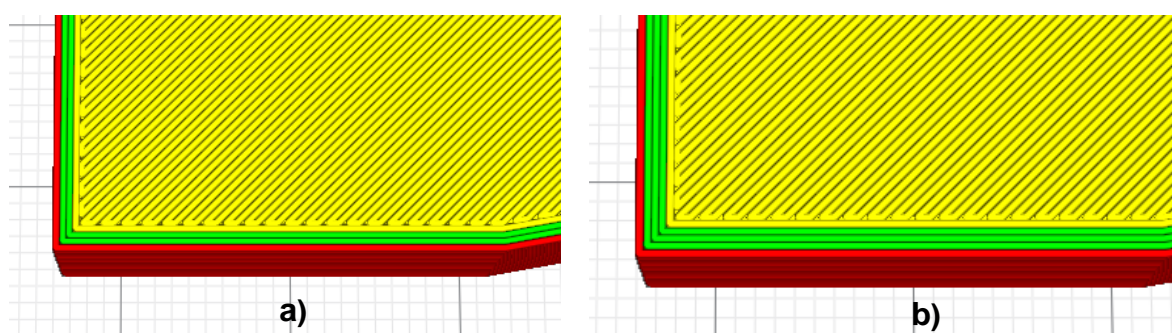


Figura 4.4 Gruixos de parets utilitzats. a) 1,2 mm; b) 1,6mm.

4.2.2.3. Densitat d'Infill

Finalment, també s'ha variat el nivell d'emplenament de les mostres. S'han utilitzat dos nivells d'infill, del 20 i del 25% (Figura 4,5 i 4.6).

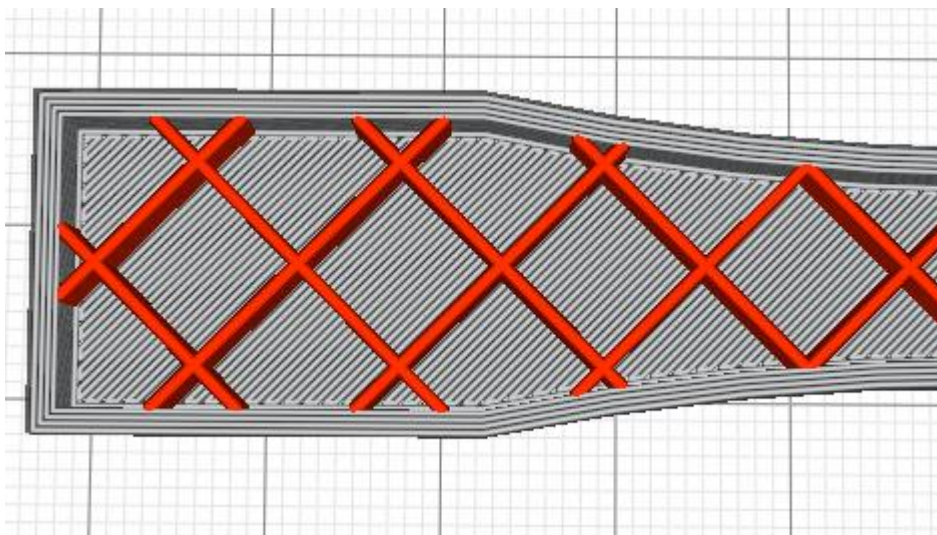


Figura 4.5 Mostra impresa amb doble capçal i un infill del 20%.

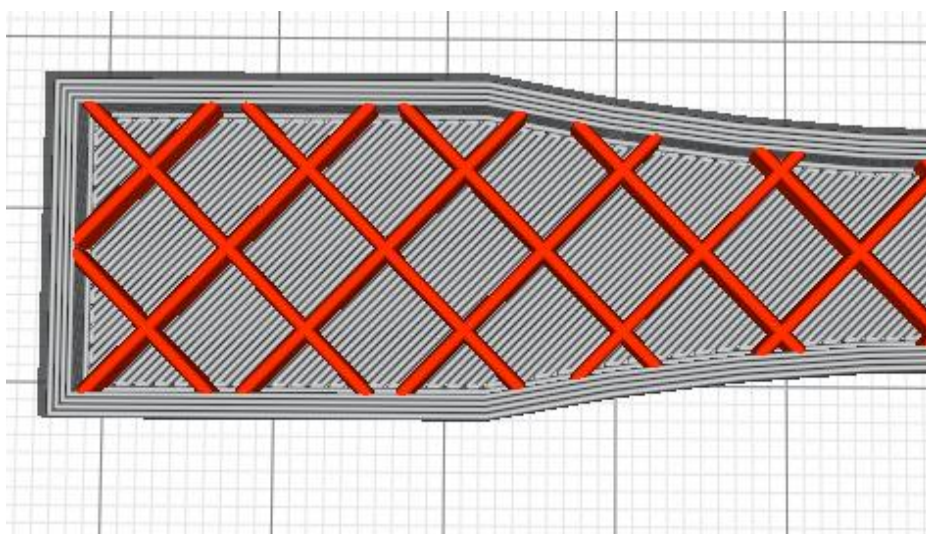


Figura 4.6 Mostra impresa amb doble capçal i un infill del 25%.

4.2.2.4. Altres paràmetres d'impressió rellevants

La resta de paràmetres d'impressió s'han mantingut constants per a totes les impressions. Els valors utilitzats de la resta de paràmetres principals es poden veure a la Taula 8.

Taula 8 Altres paràmetres d'impressió constants per a totes les mostres.

RESTA DE PARÀMETRES PRINCIPALS D'IMPRESSIÓ	
Alçada de capa	0,2 mm
Gruix de la capa superior/inferior	1 mm
Patró de les capes superior/inferior	Zig - Zag
Patró del infill	Rectangular
Temperatura d'impressió	200 °C
Temperatura de la base	60 °C
Velocitat d'impressió	60 mm/s
Velocitat de desplaçament	200 mm/s

4.2.3. Nomenclatura de les provetes

La nomenclatura utilitzada es basa, en primera instància, en el nombre de capçals utilitzats ja sigui un capçal de 0,4 mm (inicia del codi amb 04) o dos capçals, un de 0,4 mm pels perfils exteriors i un de 0,8 mm per l'infill (inicia del codi amb DUAL). A continuació, apareix una lletra identificadora per a cada combinació dels altres dos paràmetres (el gruix de la paret i la densitat d'infill); d'aquest a manera ens permet realitzar una comparació més senzilla entre les mostres realitzades amb un únic extrusor i les del dual.

A la Taula 9 s'especifiquen les diferents combinacions i la nomenclatura de les mostres.

Taula 9 Codificació de les mostres.

Codi	Capçal [mm]	Gruix de paret [mm]	Densitat d'infill [%]
04_A	0,4	1,2	20
04_B	0,4	1,2	25
04_C	0,4	1,6	20
04_D	0,4	1,6	25
DUAL_A	0,4 i 0,8	1,2	20
DUAL_B	0,4 i 0,8	1,2	25
DUAL_C	0,4 i 0,8	1,6	20
DUAL_D	0,4 i 0,8	1,6	25

4.2.4. Impressió de les provetes

La impressió de les provetes es va dur a terme a les instal·lacions de la Fundació CIM UPC. Es va utilitzar una impressora Sigma de BCN3D basada en la tecnologia FFF. El material que es va utilitzar va ser PLA de color gris i vermell de l'empresa BCN3D. La seva fitxa tècnica es pot veure a l'Annex. Es varen imprimir 5 provetes de cada configuració, tal i com s'indica a la norma, resultant-ne un total de 40.

A les Figures 4.7 i 4.8 es poden veure les 40 provetes utilitzades als assaigs de tracció; classificades i numerades seguint la classificació especificada a la Taula 7.



Figura 4.7 Mostres fabricades amb un capçal de 0.4 mm

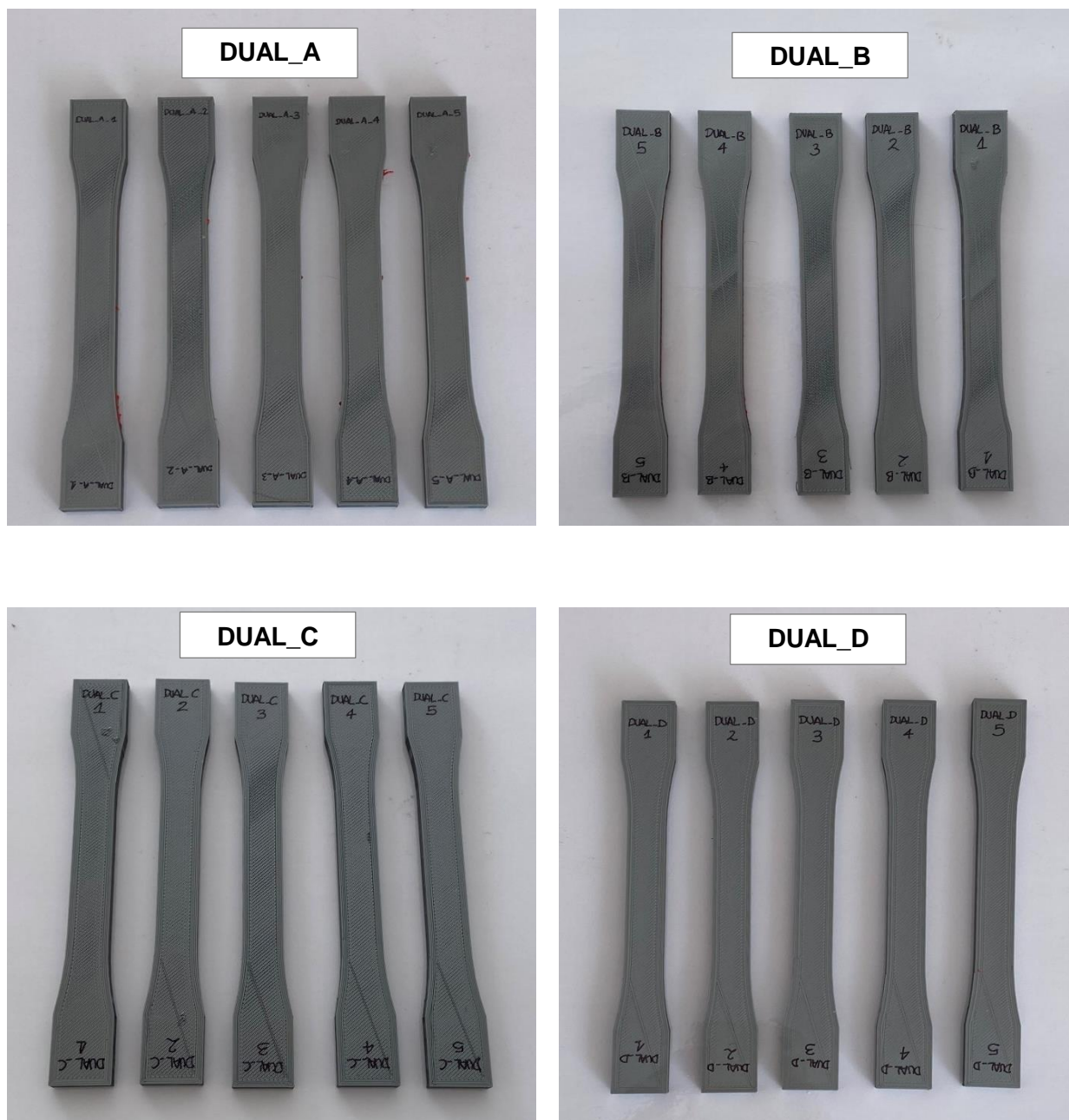


Figura 4.8 Mostres fabricades amb doble capçal independent.

Un cop impreses totes les mostres es van pesar i mesurar amb un peu de rei per tal de caracteritzar-les. A l'Annex es poden veure les dades recollides.

4.3. Tècniques de caracterització

En aquest treball fi de màster es van avaluar diferents configuracions per tal de trobar la influència de tres paràmetres diferents en les propietats mecàniques de les peces impreses amb tecnologia FFF. Per tal d'avaluar la influència de cadascun d'ells, es van utilitzar les tècniques que es descriuen a continuació.

4.3.1. Assaig de tracció

Inicialment estava previst dur a terme assaigs de tracció amb les vuit sèries de provetes fabricades. Malauradament, degut a la situació excepcional de confinament, només va ser possible assajar quatre sèries de provetes, les corresponents als següents grups:

Taula 10 Mostres que van poder ser assajades a tracció.

Sèrie	Assajada a tracció?	Sèrie	Assajada a tracció?
04_A	No	DUAL_A	Sí, les cinc mostres
04_B	Sí, les cinc mostres	DUAL_B	Sí, les cinc mostres
04_C	Sí, les cinc mostres	DUAL_C	No
04_D	No	DUAL_D	No

La comparació entre les sèries (DUAL_A – DUAL_B) va permetre analitzar l'efecte de l'infill i la comparació entre les sèries (04_B – DUAL_B) l'efecte de la morfologia de l'infill obtinguda si s'imprimeix amb un capçal de 0,4 o de 0,8 mm.

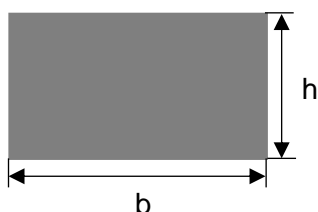
L'assaig de tracció consisteix en sotmetre una proveta a una deformació axial creixent fins a produir la ruptura de la mateixa. Durant aquest procés, s'enregistra la força que exerceix la màquina i el desplaçament que pateixen les galgues extensomètriques. A l'hora d'executar-lo s'ha seguit la norma ASTM D638-02a on es defineixen els paràmetres de l'assaig. Degut a que es va utilitzar una proveta *Type 1*, la velocitat de l'assaig es va fixar en 5 mm/min. Per a realitzar l'assaig es va utilitzar la màquina INSTRON 3366 de 10kN (INSTRON®, MA, USA). Aquesta màquina posseeix una capacitat nominal de $\pm 10\text{kN}$ i se li va connectar un extensòmetre longitudinal amb una longitud inicial de 10 mm per tal de mesurar amb precisió els allargaments (Figura 4.9). Un cop calibrada la màquina i introduïts els valors de velocitat i traçabilitat de la mostra ja es pot iniciar l'assaig.



Figura 4.9 Màquina INSTRON 3366 empleada durant l'assaig amb detall del extensòmetre.

L'assaig acaba un cop trenca la proveta. Un cop trencada s'afluïxen les mordasses i es pot tornar a realitzar un nou assaig. Com a resposta, la màquina generarà un arxiu (.dat) on apareix la força realitzada i el desplaçament, que s'exporten en un fitxer Excel pel seu tractament, tenint en compte els valors mesurats de gruix i amplada de la secció de les diferents mostres de manera individualitzada per tal d'obtenir els gràfics tensió - deformació de cada una de les mostres.

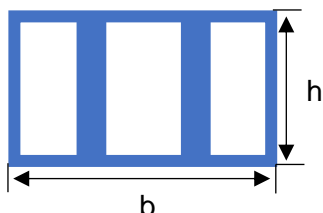
Un factor a tenir en compte és la secció utilitzada per realitzar els càlculs. Quan s'assaja una proveta sòlida a tracció, la secció transversal de la proveta equival a la secció resistent.



$$\text{Àrea transversal} = b \cdot h = \text{Àrea resistent}$$

(Eq. 1)

En canvi, en les provetes assajades aquesta igualtat no es compleix ja que la secció no és massissa sinó que conté porositat, i la secció transversal calculada externament no serà igual a la secció resistent.



$$\text{Àrea transversal (FFF)} = b \cdot h \neq \text{Àrea resistent}$$

(Eq. 2)

Cal remarcar que a mesura que augmenti el valor d'infill de la peça, l'àrea transversal s'aproximarà més al valor d'àrea resistent.

$$\lim_{\% \text{ infill} \rightarrow 100} (\text{\AA}rea transversal) = \text{\AA}rea resistant \quad (\text{Eq. 3})$$

Aquesta última equació, tot i ser certa, manca de sentit pràctic (en certa manera) ja que un dels punts forts i més explotats de l'ús de la impressió 3D és precisament la possibilitat d'estalviar material i reduir costos realitzant peces amb porositats. Per tant, generalment no s'utilitzarà per imprimir peces amb un infill del 100%.

Donada la dificultat de calcular la secció resistent, es va utilitzar la secció transversal calculada com base per altura, per tal de calcular els valors de la tensió i el mòdul elàstic aparents.

Un cop analitzades les dades, podem extreure els següents resultats:

- ❖ **Tensió aparent (σ):** Correspon a la tensió axial que pateix la proveta. Te unitats de pressió ja que equival a la càrrega per unitat de secció.

$$\sigma_x = P_x / A_0 \quad [\text{MPa}] \quad (\text{Eq. 4})$$

On:

P_x = Força de tracció [N];

A_0 = Àrea transversal aparent [mm²].

- ❖ **Deformació unitària (ϵ):** Es determina mitjançant l'extensòmetre i correspon a l'allargament patit per la zona entre les galgues extensiomètriques i la distància inicial entre les mateixes (10 mm).

$$\epsilon_x = \Delta l_x / l_0 \quad [\text{mm/mm}] \quad (\text{Eq. 5})$$

On:

Δl_x = increment de distància entre les galgues extensiomètriques [mm];

l_0 = distància inicial entre les galgues extensiomètriques [mm].

- ❖ **Mòdul de Young o mòdul d'elasticitat (E) aparent:** Correspon a la part proporcional de la corba tensió-deformació. Compleix la Llei de Hooke:

$$E = \sigma / \epsilon \quad [\text{MPa}] \quad (\text{Eq. 6})$$

On:

σ = tensió axial que rep la proveta [MPa];

ϵ = deformació.

Per tal d'obtenir el mòdul de Young, es va representar al Excel les diferents corbes

tensió – deformació i es van analitzar els punts pertanyents a la zona lineal. Es va crear una recta de tendència lineal per tal d'obtenir la pendent que equival al mòdul elàstic.

Existeixen diferents maneres d'analitzar el mòdul elàstic. Generalment en polímers es solen prendre els valors a deformacions molt baixes. En aquest cas, es va analitzar el pendent fins a valors de deformació unitària de 0,004 mm/mm.

- ❖ **Treball a fractura:** Correspon al treball necessari per trencar en dues peces una mostra carregada a flexió. Es determina calculant l'àrea total existent sota la corba força - desplaçament. Pel seu càlcul es va generar amb Excel una línia de regressió de grau tres ja que s'adaptava a la corba. Es va crear l'equació d'aquesta recta de regressió i es va calcular la integral definida entre zero i el valor de desplaçament màxim mitjançant el software Octave UPM R8.2. Les comandes utilitzades van ser les següents.

```
>> % 1. Es defineix la funcio amb els coeficients obtinguts a la recta de regressio
>> fun= @(x) -47.107*x^3 - 7.0497*x^2 + 11.462*x - 0.0061;
>>
>> % 2. Es calcula la integral definida amb la comanda "quad".
>> [area,ierror,nfneval]=quad("nom de la funcio", xmin , xmax);
```

El valor retornat com a variable "area" és el resultat de calcular l'integral definida entre els valors de desplaçament mínim (xmin) i màxim (xmax) i, per tant, equival al treball a fractura.

Per analitzar estadísticament els valors obtinguts en els diferents assajos i saber si les diferències són significatives es va utilitzar el programa Minitab 18. Es va realitzar un estudi ANOVA d'un factor comparatiu de Tukey amb un interval de confiança del 95% (valor d'alfa igual a 0,05).

4.3.2. Simulació mitjançant elements finits

La simulació mitjançant elements finits es va utilitzar per poder analitzar com es distribueixen les tensions a través de les diferents configuracions. Per dur-ho a terme es va fer servir el software ANSYS® (R3, Release 2019). Les diferents provetes van ser dissenyades mitjançant el software SolidWorks (Release 2018).

Per tal de reduir el nombre d'elements a estudiar, es va estudiar únicament la part de la canya de la proveta. Les dimensions utilitzades per definir la geometria, van ser els valors nominals de cada proveta; amb una llargària de 57 mm, un gruix de 7 mm i un ample de 13 mm. L'infill es va reproduir prenent les dades utilitzades pel software BCN3D Cura, per tal de simular el més acuradament possible l'arquitectura interna de cada mostra. A la Figura 4.10 es pot veure el disseny de la proveta realitzat amb SolidWorks.

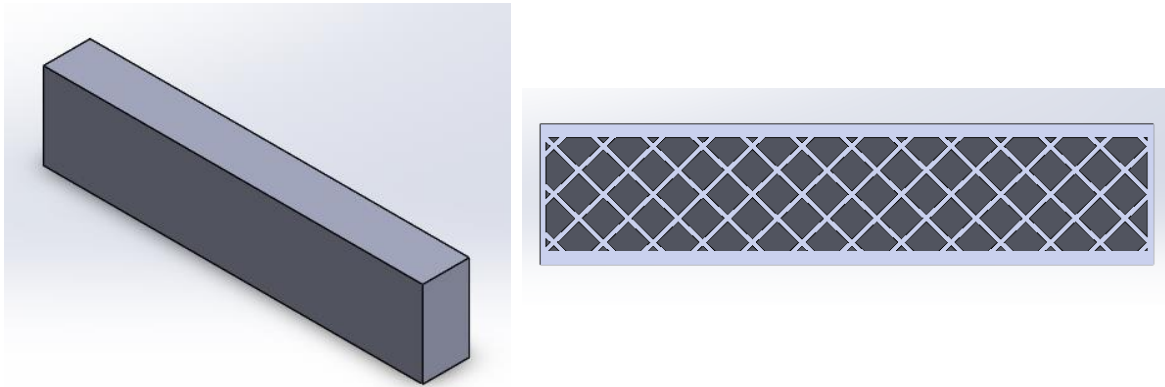


Figura 4.10 Vista isomètrica i de secció d'una canya de proveta dissenyada amb SolidWorks.

El material va ser definit com BCN3D PLA, amb les propietats mecàniques estipulades al full del proveïdor (veure Annex); prenent un coeficient de Poisson de 0,37. Es va simular com un material lineal, elàstic i isotrop. No es va poder simular el procés de fabricació utilitzat i per tant les unions entre capes no estan contemplades; ANSYS ho tracta com unions perfectes com si es tractes d'una peça injectada.

Un cop definits el material i la geometria, es va definir el mallat utilitzat. Es va utilitzar un mallat controlat pel programa; definint una mida d'element de 0,5 mm per totes les simulacions.

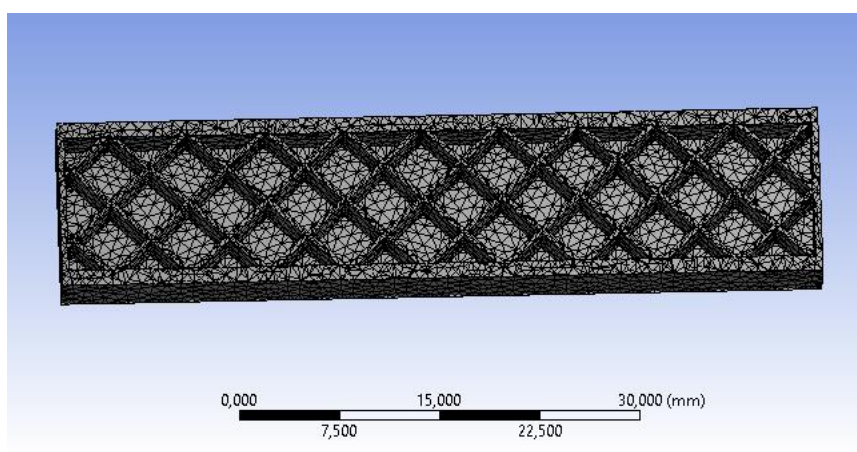


Figura 4.11 Exemple de malla utilitzada per la simulació.

Per a totes les provetes, es va dur a terme un anàlisi *Static Structural* fixant un extrem i aplicant un desplaçament de 0,057 mm a un extrem de la mostra, el qual, correspon a una deformació unitària de 0,001 mm/mm.

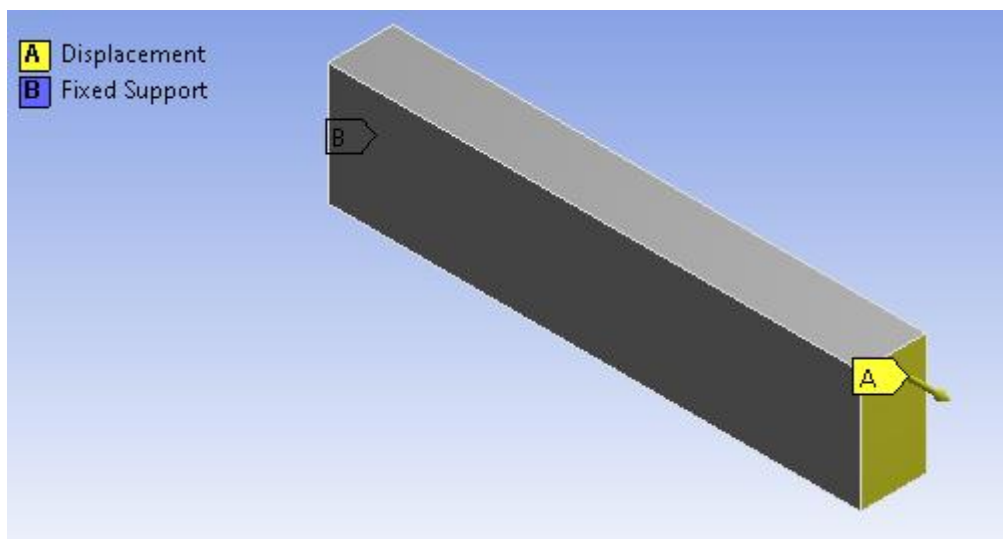


Figura 4.12 Condicions de contorn emprades per la simulació.

4.3.3. Anàlisi visual del acabat superficial i detecció de defectes

Per valorar els defectes deguts al procés d'impressió que poguessin afectar al comportament mecànic de les mostres, es va realitzar un anàlisi visual per detectar-los. Un cop detectats i documentats amb imatges; es van determinar les possibles causes i les seves corresponents solucions.

4.3.4. Anàlisi dels temps d'impressió

Per últim, es va realitzar un estudi per tal d'avaluar quina es la importància relativa de tots tres paràmetres utilitzats respecte al temps d'impressió. Per tal de valorar aquest efecte es va utilitzar el software estadístic MINITAB 18, per analitzar els efectes principals i les interaccions en el disseny factorial de tres factors (2^3) representat a les Taules 6 i 7. La resposta analitzada va ser el temps que el programa BCN3D Cura v3.2.0 estima que triga en completar la impressió de la sèrie completa de cinc provetes.

5. RESULTATS I DISCUSSIÓ

5.1. Assaig de tracció

5.1.1. Gràfics tensió deformació

Les corbes tensió-deformació de les diferents series estudiades es mostren a la Figura 5.1.

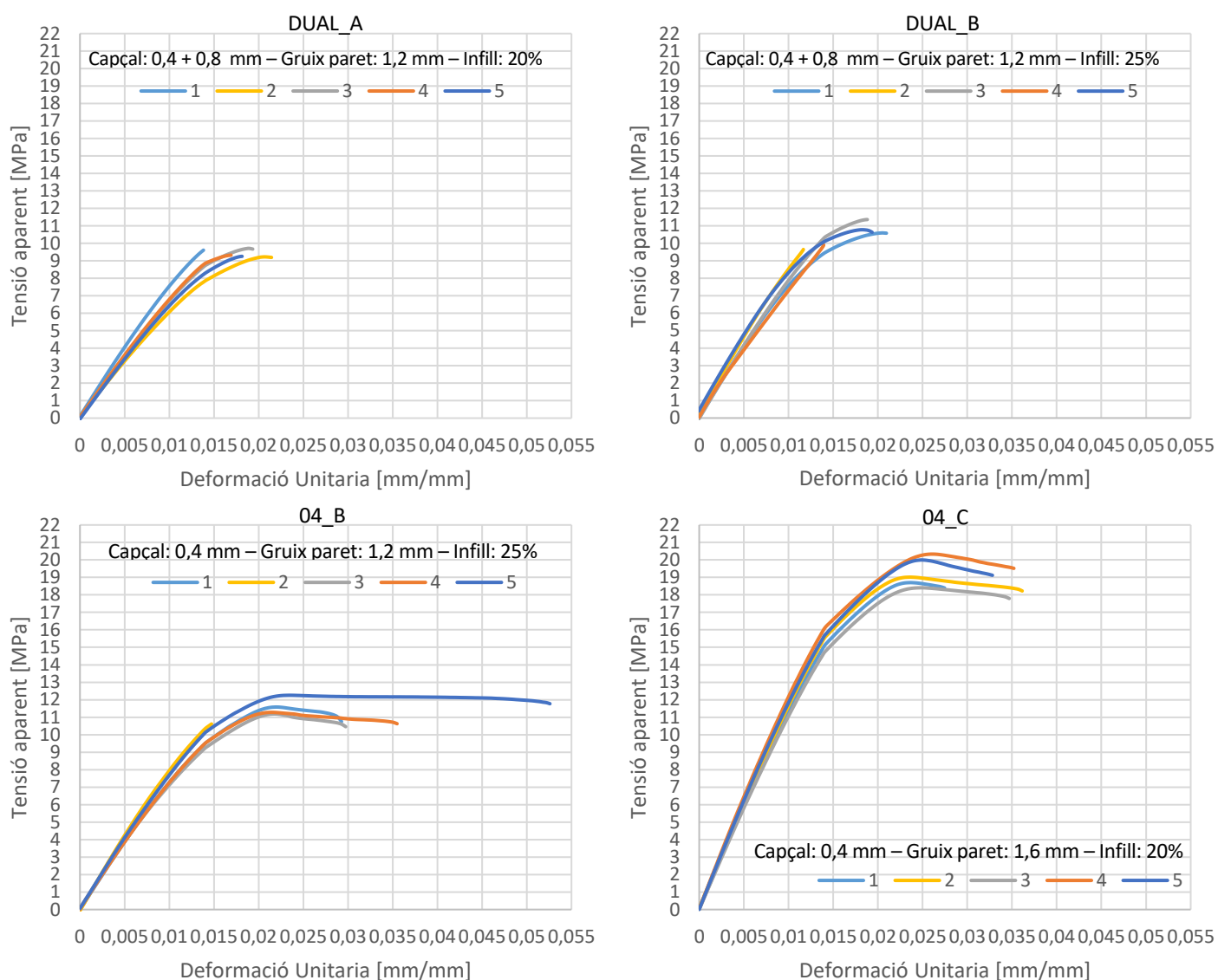


Figura 5.1 Gràfics tensió-deformació de les mostres assajades.

5.1.2. Resistència a tracció aparent

A partir dels gràfics de tensió-deformació de l'apartat anterior, es van extreure els valors de resistència a la tracció. S'ha de considerar que degut a que es treballa amb mostres poroses, la secció transversal no equival a la secció resistent de la peça. Per tant, cal remarcar que aquesta resistència a la tracció és aparent.

A la Taula 11 es poden veure els valors de la mitjana i desviació estàndard de les sèries. Els valors obtinguts per cada mostra es poden trobar a l'Annex.

Taula 11 Valors de resistència a tracció aparent.

Codi	Resistència a la tracció aparent [MPa]	
	Mitjana	Desviació Estàndard
DUAL_A	9,42	0,22
DUAL_B	10,45	0,68
04_B	11,38	0,60
04_C	19,29	0,83

Analitzant els valors tabulats, s'aprecia que el valor més gran de resistència a la tracció, de mitjana, el té la sèrie 04_C; mentre que el més baix la sèrie DUAL_A. Els valors obtinguts per les sèries 04_B i DUAL_B són molt similars entre sí, tot i que lleugerament més elevat el de 04_B.

Per tal de determinar si aquestes diferències eren significatives, es va realitzar un estudi estadístic utilitzant Minitab 18. Els resultats obtinguts de l'estudi ANOVA d'un factor comparatiu de Tukey es mostren a continuació (Figura 5.2).

Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
04_C - 04_B	7,905	0,397	(6,768; 9,042)	19,91	0,000
DUAL_A - 04_B	-1,960	0,397	(-3,097; -0,822)	-4,93	0,001
DUAL_B - 04_B	-0,928	0,397	(-2,065; 0,209)	-2,34	0,131
DUAL_A - 04_C	-9,865	0,397	(-11,002; -8,728)	-24,84	0,000
DUAL_B - 04_C	-8,833	0,397	(-9,970; -7,696)	-22,25	0,000
DUAL_B - DUAL_A	1,032	0,397	(-0,106; 2,169)	2,60	0,082

Nivel de confianza individual = 98,87%

Figura 5.2 Valors obtinguts de l'estudi ANOVA dels resultats de resistència de tracció.

Analitzant els resultats obtinguts a l'estudi ANOVA, i filtrant els casos que són interessants comparar es determina que:

- Les diferències entre les sèries DUAL_B i 04_B no són significatives ja que el seu p-valor és molt superior a 0,05.
- Les diferències entre les sèries DUAL_A i DUAL_B, no són significatives ja que el seu p-valor està lleugerament per sobre del valor alfa de 0,05.
- Les diferències entre els valors de resistència a tracció de la sèrie 04_C i la resta són estadísticament significatius; ja que en tots els casos el seu p-valor és inferior a 0,05.

Si es filtren les sèries que es volien estudiar, podem generar la Taula 12.

Taula 12 Resum dels paràmetres variats en cada sèrie i el significat de les diferències trobades.

Series	Paràmetres variats	Diferència
DUAL_A – DUAL_B	Densitat d'infill (20% - 25%)	NO SIGNIFICATIVA
DUAL_B – 04_B	Capçal (Dual – 0,4 mm)	NO SIGNIFICATIVA
04_C – (DUAL_A, DUAL_B, 04_B)		SIGNIFICATIVA

Per tant es conclou que els efectes de tenir una diferent morfologia de l'infill de la mostra amb un mateix nivell de densitat no són significatius en termes de resistència a la tracció. En segon lloc, es pot considerar que els efectes de tenir una diferència del 5% en la densitat de l'infill no és significativa tot i que està molt pròxima a ser-ho ($p = 0,08$).

D'aquests resultats és pot extreure la gran influència que té el gruix de la paret en relació al valor de resistència màxima de tracció. La sèrie 04_C, en comparació amb la 04_B, varia en el valor d'infill i en el gruix de paret. Al determinar que el valor d'infill no és significatiu, la diferència observada es pot atribuir a la diferència de gruix de la paret.

Per altre banda, un dels grans punts febles de la impressió 3D, pel que fa al comportament mecànic, són les unions imperfectes entre capes. Per tal de fer una estimació de la pèrdua de propietats mecàniques que es poden atribuir als defectes associats a la tecnologia FFF, es va comparar el valor experimental de resistència a tracció aparent de les mostres FFF amb el valor ideal que tindria una peça de PLA, per exemple fabricada per injecció, amb una secció resistent equivalent a les mostres assajades.

Per calcular el valor de resistència a tracció ideal, es va calcular la secció resistent de les provetes assajades, és a dir, el percentatge d'àrea ocupada respecte l'àrea transversal nominal de 91 mm², tenint en compte tant el gruix de la paret com el percentatge d'infill de la zona interna de la proveta. Els valors obtinguts es mostren a continuació (Taula 13).

Taula 13 Valors de l'àrea resistent teòrica i percentatge respecte l'àrea transversal.

Sèrie	Àrea resistent teòrica [mm ²]	Percentatge respecte l'àrea transversal [%]
DUAL_A	48,60	53,41
DUAL_B	51,25	56,32
04_B	51,25	56,32
04_C	51,80	56,92

Normalitzant la resistència a tracció nominal aportada pel fabricant, que és de 70 MPa, per aquests coeficients, s'obté la resistència a la tracció ideal per les seccions resistents corresponents a cada sèrie. A la Taula 14 es poden veure els valors obtinguts.

Taula 14 Valors de resistència a la tracció aparent i ideal aproximada.

Sèrie	Resistència a la tracció aparent experimental [MPa]	Resistència a la tracció ideal teòrica [MPa]	Reducció de la resistència de tracció [%]
DUAL_A	9,42	37,38	74,8
DUAL_B	10,45	39,42	73,5
04_B	11,38	39,42	71,1
04_C	19,29	39,85	51,6

Comparant els valors de la Taula 14 es va determinar que el fet d'imprimir mostres mitjançant impressió FFF comporta un descens en els valors de resistència a la tracció que es poden atribuir a la debilitat de les intercares generades deguts a les unions més dèbils que s'originen al imprimir. El fet de generar intercares durant la impressió, debilita la peça creant concentracions de tensions que acabaran provocant la fallada de la peça. Si a més a més de la creació d'intercares pròpies del fet d'imprimir el material existeixen altres defectes d'impressió com poden ser per exemple la delaminació o un flux insuficient de material poden disminuir encara més les propietats mecàniques.

5.1.3. Mòdul de Young aparent

A partir dels gràfics de tensió-deformació es van extreure també els valors del mòdul de Young o mòdul d'elasticitat, que és el valor del pendent de la recta en la regió de deformació elàstica. Per calcular-lo s'han utilitzat deformacions fins a 0,004 mm/mm. S'ha de considerar que degut a que es treballa amb mostres poroses, la secció transversal no equival a la secció resistent de la peça. Per tant, es tracta d'un mòdul de Young aparent. A la Figura 5.3 es pot veure un exemple de gràfic utilitzat per trobar el valor del pendent a baixes deformacions. La resta de gràfiques es poden trobar a l'Annex.

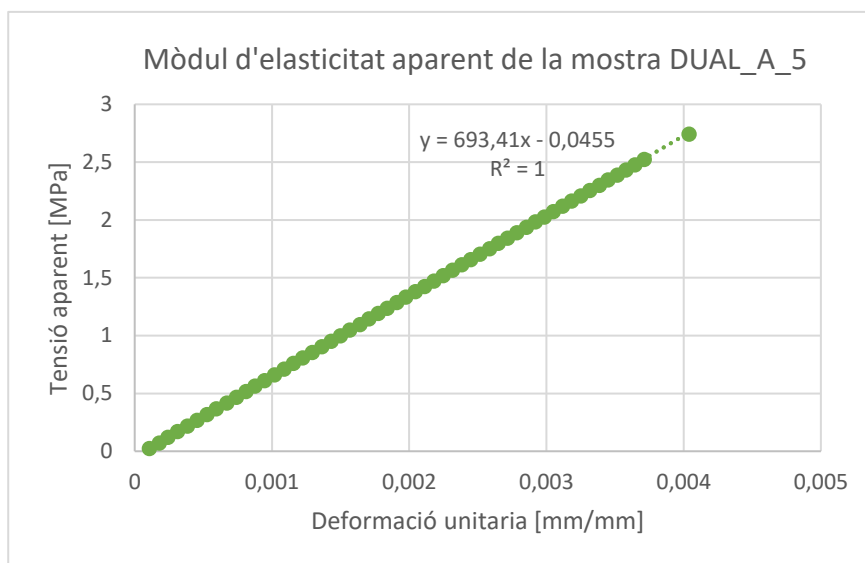


Figura 5.3 Pendent de la corba tensió deformació en zona de baixes deformacions.

A la Taula 15 es poden veure els valors de la mitjana i desviació estàndard del mòdul elàstic de les diferents series. Els valors obtinguts de cada mostra es troben tabulats a l'Annex.

Taula 15 Valors del mòdul d'elasticitat aparent.

Codi	Mòdul d'elasticitat aparent [MPa]	
	Mitjana	Desviació Estàndard
DUAL_A	713	57
DUAL_B	850	54
04_B	805	42
04_C	1228	50

Analitzant els valors tabulats, el valor més gran del mòdul d'elasticitat, de mitjana, el té la sèrie 04_C mentre que el més baix la sèrie DUAL_A. Aquests valors obtinguts estan relacionats amb els de l'apartat anterior i per tant té sentit obtenir les mateixes sèries com a mitjanes més altes i baixes.

Per tal de determinar si les diferències que existeixen entre series eren significatives, es va realitzar un estudi estadístic utilitzant Minitab 18. Els resultats obtinguts de realitzar un estudi

ANOVA d'un factor comparatiu de Tukey es mostren a la Figura 5.4.

Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
04_C - 04_B	423,4	31,7	(332,6; 514,3)	13,34	0,000
DUAL_A - 04_B	-92,1	31,7	(-183,0; -1,2)	-2,90	0,046
DUAL_B - 04_B	44,6	31,7	(-46,3; 135,5)	1,41	0,514
DUAL_A - 04_C	-515,6	31,7	(-606,4; -424,7)	-16,25	0,000
DUAL_B - 04_C	-378,8	31,7	(-469,7; -287,9)	-11,94	0,000
DUAL_B - DUAL_A	136,8	31,7	(45,9; 227,6)	4,31	0,003

Nivel de confianza individual = 98,87%

Figura 5.4 Valors obtinguts de l'estudi ANOVA del mòdul d'elasticitat aparent.

Analitzant els resultats obtinguts a l'estudi, podem veure que existeixen diferències significatives entre totes les sèries, exceptuant entre la DUAL_B i la 04_B. Les diferències entre aquestes dues sèries no són significatives, tal i com es pot veure amb el p-valor, molt superior a 0,05.

Si es filtren les sèries que es volien estudiar, podem generar la Taula 16.

Taula 16 Resum dels paràmetres variats en cada sèrie i el significat de les diferències trobades.

Sèries	Paràmetres variats	Diferència
DUAL_A – DUAL_B	Densitat d'infill (20% - 25%)	SIGNIFICATIVA
DUAL_B – 04_B	Capçal (Dual – 0,4 mm)	NO SIGNIFICATIVA
04_C – (DUAL_A, DUAL_B, 04_B)		SIGNIFICATIVA

Per tant es conclou que els efectes de tenir una diferent morfologia de l'infill de la mostra amb un mateix nivell de densitat no són significatius en termes de mòdul d'elasticitat.

5.1.4. Deformació a fractura

La deformació a fractura es va calcular traçant una línia paral·lela a la zona elàstica des del punt de fractura, on el punt de tall amb l'eix X determina la deformació a fractura. A la Figura 5.5 es pot veure un exemple de gràfic utilitzat per trobar el valor de deformació a fractura.

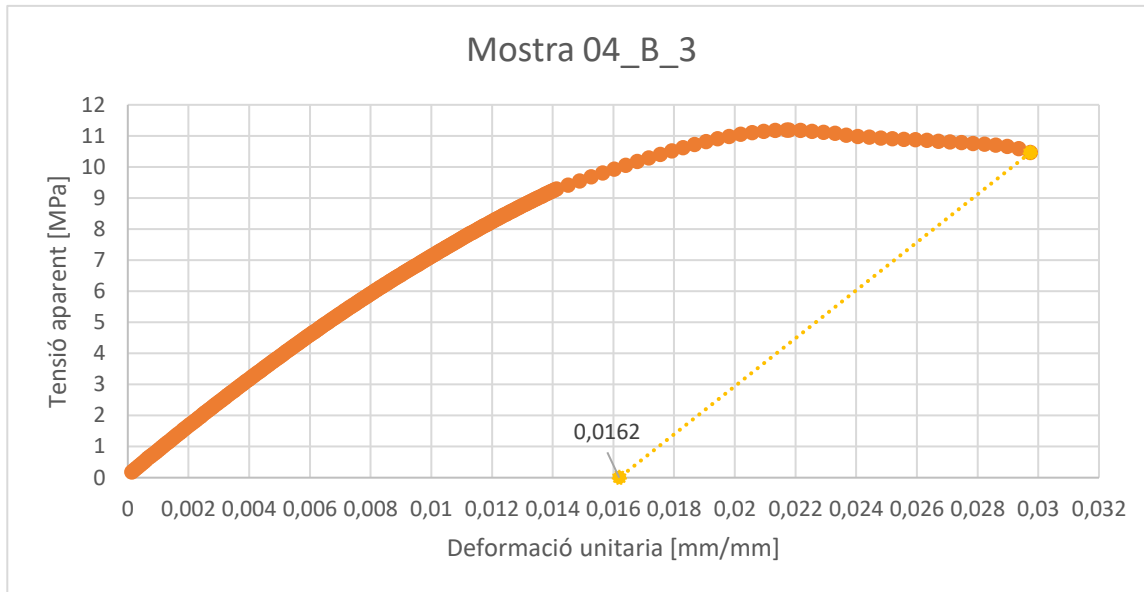


Figura 5.5 Determinació del valor de deformació a fractura.

A la Taula 17 es poden veure els valors de la mitjana i desviació estàndard de la deformació a fractura.

Taula 17 Valors de deformació a fractura.

Codi	Deformació a fractura [mm/mm]	
	Mitjana	Desviació Estàndard
DUAL_A	0,00443	0,0017
DUAL_B	0,00462	0,0033
04_B	0,01887	0,013
04_C	0,01821	0,0035

Els resultats mostren dos grups diferenciats. El grup amb el valor més elevat correspon a les mostres 04, fabricades amb un únic capçal. Els valors més baixos han estat registrats en les mostres impreses amb dos capçals independents.

Per determinar si les diferències existents són significatives es va realitzar un estudi estadístic. Els resultats es mostren a continuació (Figura 5.6).

Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
04_C - 04_B	-0,00065	0,00440	(-0,01324; 0,01194)	-0,15	0,999
DUAL_A - 04_B	-0,01444	0,00440	(-0,02703; -0,00185)	-3,28	0,022
DUAL_B - 04_B	-0,01425	0,00440	(-0,02684; -0,00166)	-3,24	0,024
DUAL_A - 04_C	-0,01378	0,00440	(-0,02637; -0,00119)	-3,14	0,029
DUAL_B - 04_C	-0,01359	0,00440	(-0,02618; -0,00100)	-3,09	0,032
DUAL_B - DUAL_A	0,00019	0,00440	(-0,01240; 0,01278)	0,04	1,000

Nivel de confianza individual = 98,87%

Agrupar información utilizando el método de Tukey

Serie	N	Media	Agrupación
04_B	5	0,01887	A
04_C	5	0,01821	A
DUAL_B	5	0,00462	B
DUAL_A	5	0,004430	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 5.6 Resultats de l'estudi ANOVA de la deformació a fractura.

Els resultats de l'estudi mostren que les diferències entre els grups 04 i DUAL són significatives. Per tant, les mostres impreses amb un sol capçal de 0,4 mm suporten una deformació a fractura significativament més elevada.

5.1.5. Treball de fractura

El treball de fractura es va calcular tal i com s'ha explicat a l'apartat 4.3.1. La Figura 5.7 mostra un exemple de com es va analitzar el gràfic força – deformació. Es pot apreciar l'equació de la línia de tendència polinòmica de grau tres que va ser utilitzada en aquest cas així com el seu ajust.

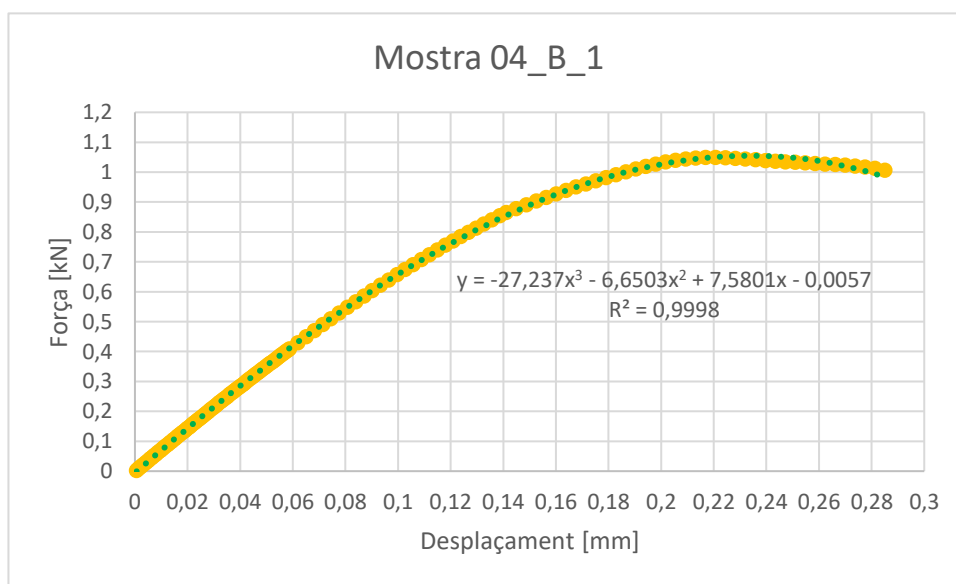


Figura 5.7 Gràfic força-desplaçament de la mostra 04_B_1 obtingut experimentalment.

Un cop obtinguda la corba, es van calcular les àrees mitjançant Octave. Els resultats obtinguts es mostren a la Taula 18.

Taula 18 Valors del treball de fractura.

Codi	Treball de fractura [mJ]	
	Mitjana	Desviació Estàndard
DUAL_A	90,15	15,97
DUAL_B	99,6	36,5
04_B	253,2	148,4
04_C	421,5	63,3

Els resultats mostren que la sèrie 04_C té un valor molt més elevat que la resta, seguit de la 04_B i finalment els valors més baixos són de les series DUAL_B i DUAL_A, respectivament.

Per determinar si aquestes diferències són significatives es va realitzar un estudi estadístic. Els resultats obtinguts van ser els següents (Figura 5.18).

Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado	Agrupar información utilizando el método de Tukey			
						Serie	N	Media	Agrupación
04_C - 04_B	168,3	52,6	(17,8; 318,8)	3,20	0,026	04_C	5	421,5	A
DUAL_A - 04_B	-163,1	52,6	(-313,6; -12,5)	-3,10	0,031	04_B	5	253,2	B
DUAL_B - 04_B	-153,6	52,6	(-304,1; -3,1)	-2,92	0,044	DUAL_B	5	99,6	C
DUAL_A - 04_C	-331,3	52,6	(-481,9; -180,8)	-6,30	0,000	DUAL_A	5	90,15	C
DUAL_B - 04_C	-321,9	52,6	(-472,4; -171,4)	-6,12	0,000				
DUAL_B - DUAL_A	9,5	52,6	(-141,1; 160,0)	0,18	0,998				

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Nivel de confianza individual = 98,87%

Figura 5.8 Resultats de l'estudi ANOVA del treball de fractura.

Analitzant els valors que es van obtenir de les probes simultànies de Tuckey, existeixen diferències significatives entre les sèries exceptuant entre les sèries DUAL_A i DUAL_B on el seu p-valor ($p = 0,998$) és superior a 0,05. Per tant, com es pot veure a la Figura 5.8, apareixen tres grups significativament diferents.

Comparant els resultats amb els obtinguts de l'anàlisi de deformació màxima, es pot veure que apareix un grup significativament diferent més. Aquest fet és degut a que al calcular el treball de fractura, es té en compte també la tensió i és en aquesta variable on la diferència entre la sèrie 04_C i la 04_B es fa significativa.

5.2. Modelització per elements finits

Seguint el procediment explicat a l'apartat 4.5.2, es van modelitzar mitjançant elements finits les canyes de les diferents provetes i es va simular el seu comportament aplicant un desplaçament de 0,057 mm; equivalent a una deformació unitària de 0,001 mm/mm.

5.2.1. Distribució de tensions

Els resultats de les diferents sèries es poden veure a continuació.

5.2.1.1. Distribució de tensions a la cara lateral

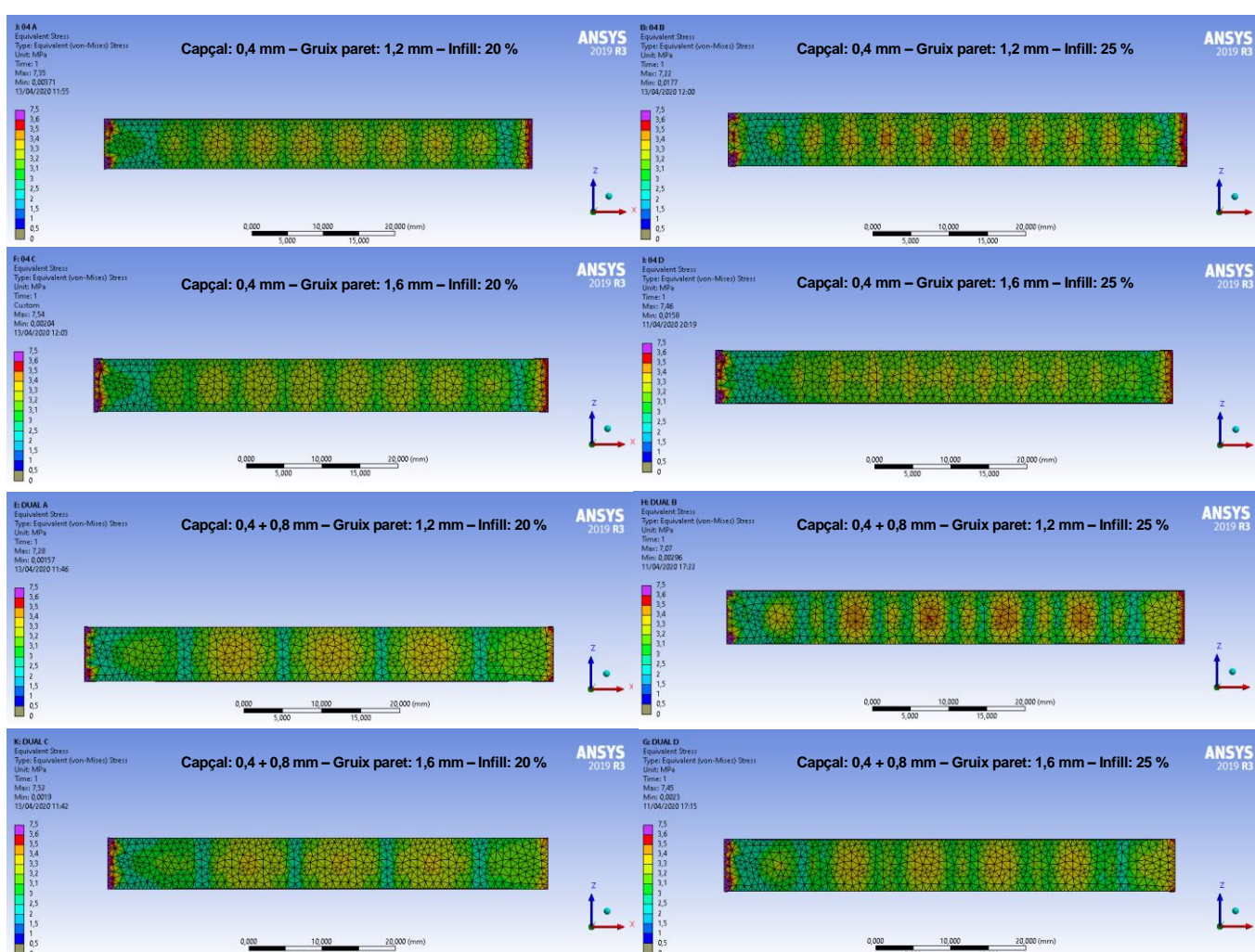


Figura 5.9 Distribució de tensions de la cara lateral de les mostres.

Les imatges mostren que les sèries que tenen un infill del 25% i una paret de 1,2 mm pateixen concentracions de tensions a la superfície externa. En canvi, les sèries que tenen una paret de gruix 1,6 mm, distribueixen millor les tensions a través de tota la paret, eliminant possibles punts de concentració de tensions. Es pot veure també que les zones on apareixen les

concentracions de tensions són zones on la paret no pot descarregar tensions sobre l'infll ja que corresponen a zones buides, on no passa el nervi i per tant no hi pot descarregar tensió.

5.2.1.2. Distribució a la cara superior

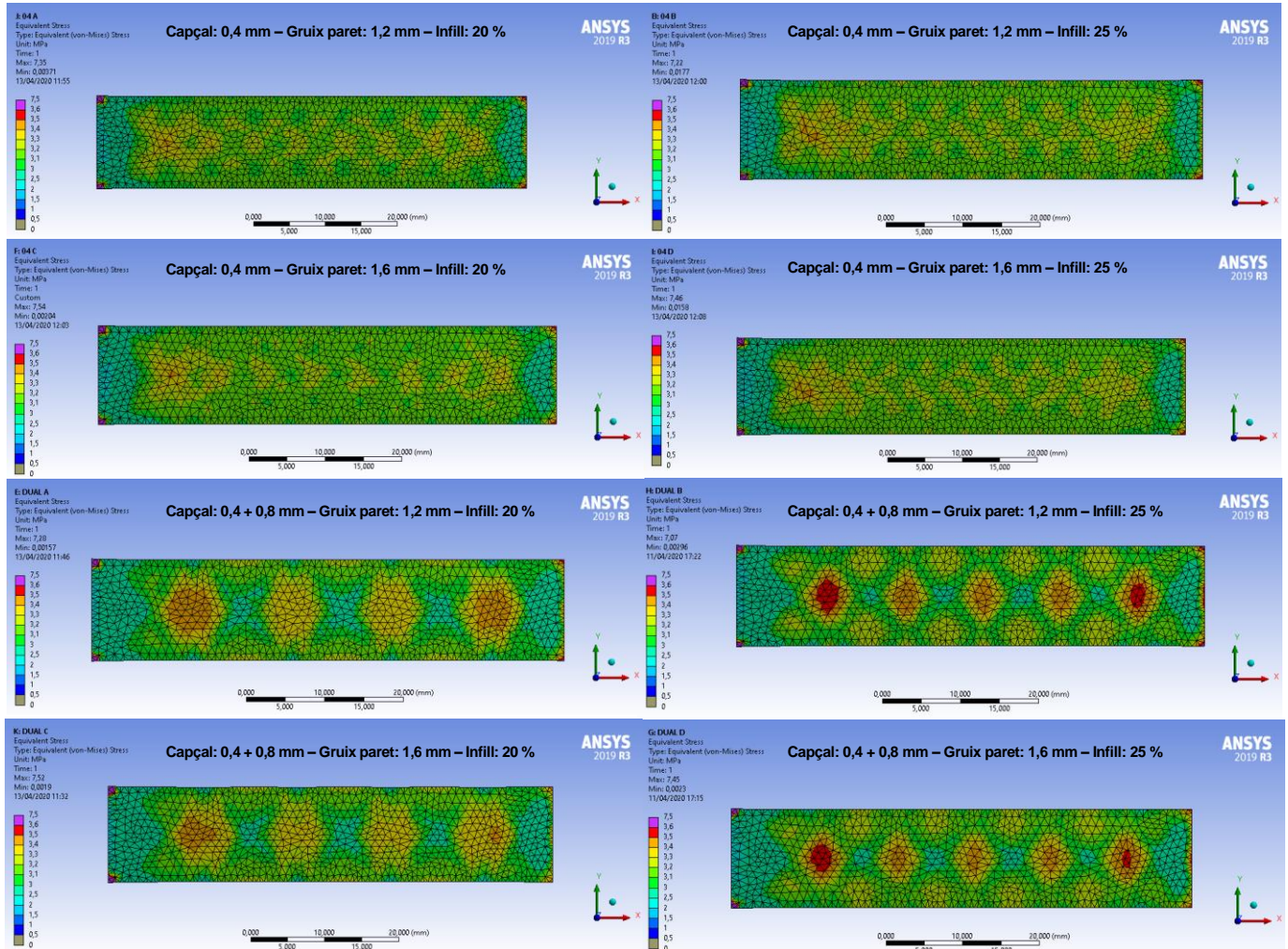


Figura 5.10 Distribució de tensions de la cara superior de les mostres.

Avaluant les imatges de la tapa superior de les provetes (Figura 5.10), es pot veure que la distribució de tensions va molt lligada a l'estructura de l'infll, que depèn del capçal utilitzat i de la densitat per imprimir-lo.

L'infll imprès amb el capçal de menor diàmetre (0,4 mm) resulta en una distribució de tensions més homogènia, i les mostres arriben a uns nivells de tensió més baixos que les mostres impreses amb un capçal de 0,8 mm. A les quatre imatges superiors, apareixen petites àrees de tonalitat groguenca amb uns valors aproximats de 3,2 MPa mentre que a les quatre imatges

inferiors hi ha grans zones de concentracions de tensions per sobre dels 3,4 MPa

Per altre banda, les tensions enregistrades en les mostres amb un 25% d'infill (mostres B, D) són majors que les detectades a les del 20%. Aquestes diferències es veuen de manera més clara a les mostres on l'infill és imprès amb un capçal de 0,8 mm.

Aquests resultats evidencien que a igualtat de percentatge d'infill, el fet d'imprimir amb un filament més gruixut augmenta les concentracions de tensions en certes zones de la peça degut a que l'infill està més espaiat entre si. A més a més, l'increment de densitat d'infill també produeix un augment en el valor de les tensions.

5.2.1.3. Distribució interna

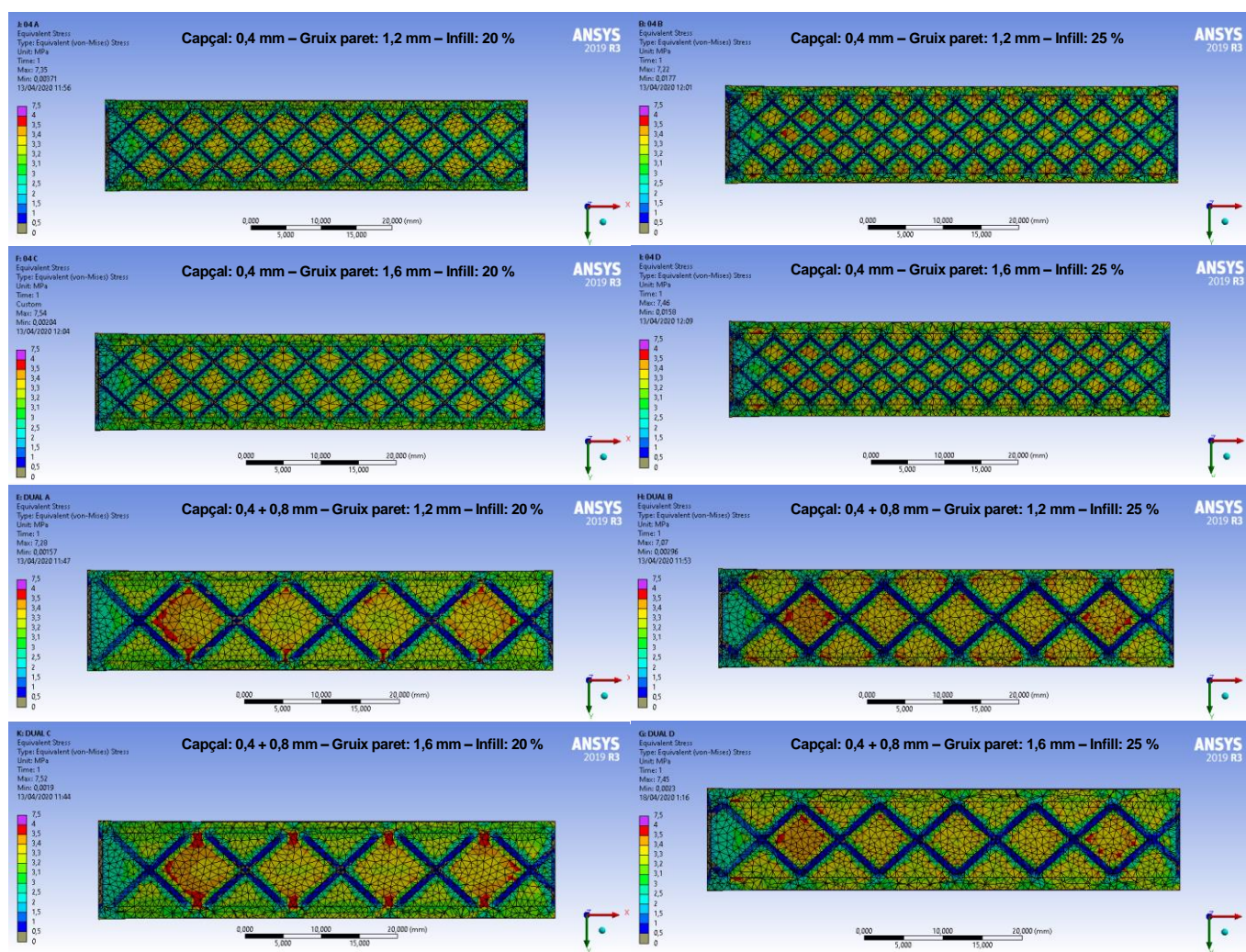


Figura 5.11 Distribució de tensions de la secció interna de les mostres.

Les imatges de la secció interna (Figura 5.11) mostren que les tensions estan menys repartides en les mostres fabricades amb un capçal de 0,8 mm. Les concentracions es troben principalment en les zones centrals. Aquest fet concorda amb les conclusions extretes de la cara superior (Figura 5.9) on s'ha vist que la estructura que es genera al imprimir l'infill amb

un capçal de 0,8 mm tendeix a crear més concentracions. Per altre banda, les mostres amb l'infill imprès amb un capçal de 0,4 mm tenen una distribució més uniforme.

Un altre fet a destacar és que en totes les configuracions la paret és la part de la peça que suporta gran part dels esforços, tot i que l'infill ajuda a descarregar i distribuir aquestes tensions. Aquest fet es reflexa en la imatge DUAL_C on apareixen concentracions de tensions en la cara interna de la paret perquè al no haver-hi infill, no pot descarregar i distribuir aquestes tensions.

5.3. Inspecció visual

Durant la inspecció visual, es van detectar una sèrie de defectes produïts durant el procés d'impressió.

a) Defectes en el flux del material

Aquesta tipologia de defecte es caracteritza per presentar porositats entre les capes impreses. Es va detectar únicament en algunes mostres DUAL_A on, tal i com mostra la Figura 5.12, presentaven un infill amb porositats entre les capes impreses.

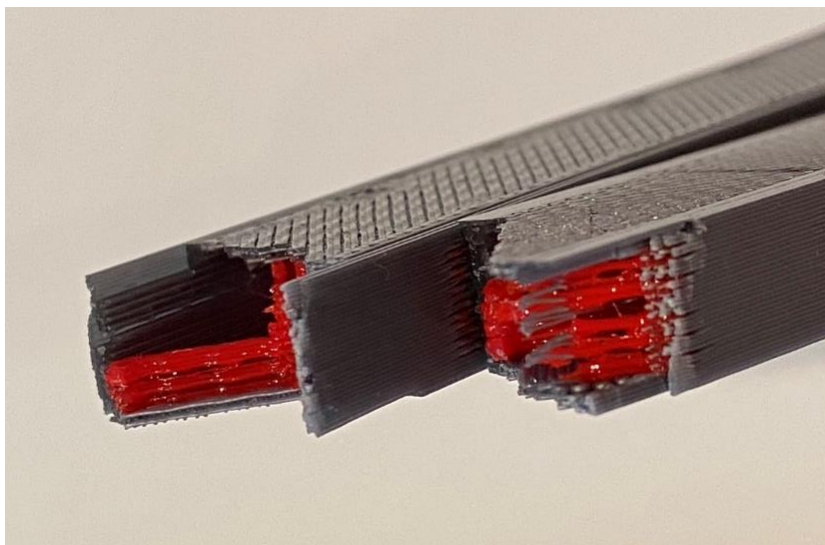


Figura 5.12 Detall de la mostra DUAL_A_2.

Aquest fenomen està provocat per un flux de material massa baix. Si no s'extreu el material suficient, el capçal avança de manera que els fils de material no es disposen annexos els uns als altres i, per tant, apareixen buits entre ells. Aquests buits provoquen un descens important en les propietats mecàniques de la mostra.

El defecte es pot solucionar augmentant el flux de plàstic. Aquest paràmetre és pot corregir directament des del software que prepara la impressió. Concretament, en el BCN3D Cura 3.2.0, el paràmetre a modificar seria l'anomenat *Flux* que permet multiplicar per un cert percentatge la quantitat de material extruït. En aquest treball es va utilitzar un flux del 100% per fabricar les mostres; per tal d'evitar aquest tipus de defectes seria adient utilitzar un valor de 125%.

b) Defectes deguts a la falta de suport dels filaments (regions impreses en voladís)

El defecte detectat es degut a la separació entre les línies d'infill. El fet de no tenir un suport a que per gravetat les capes de la paret superior es deformin i caiguin degut al seu pes propi.

Aquest defecte es va detectar en les mostres DUAL_A i DUAL_B, les quals, presenten els defectes a la superfície superior de la mostra. Aquest fenomen només es va detectar en mostres on l'infill va ser imprès amb un capçal de 0,8 mm. En cap mostra amb l'infill imprès amb un capçal de 0,4 mm es va detectar aquest defecte. Això es degut a que les distàncies entre l'infill són menors i que per tant la paret superior té el suport suficient per no deformar-se. A la Figura 5.13 es pot veure el defecte detectat i com els filaments cauen degut a la gravetat.

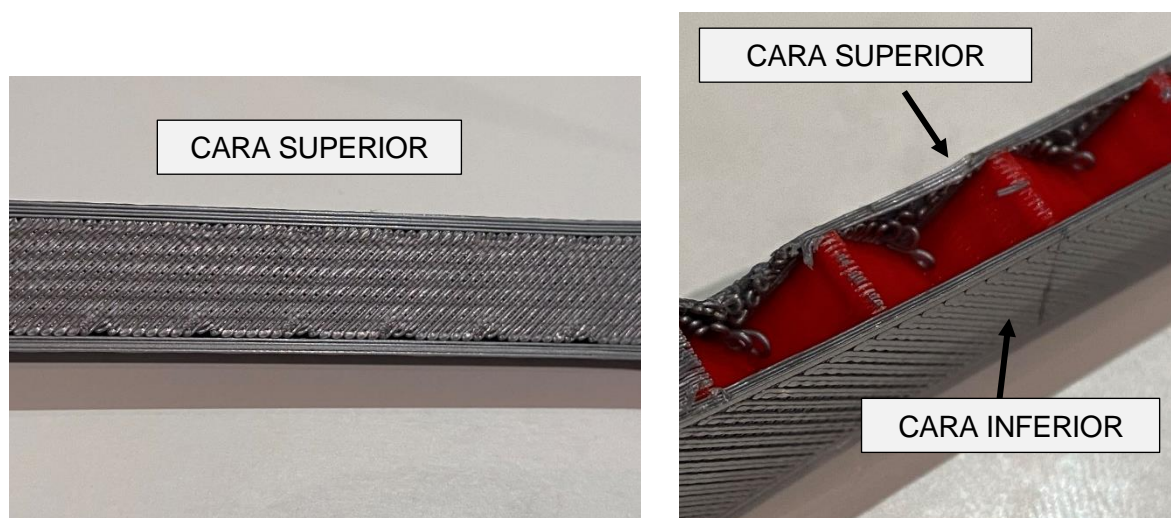


Figura 5.13 Detall del defecte superficial de la mostra DUAL_B_2.

Per tal de solucionar aquest defecte, cal modificar el patró utilitzat per l'infill o bé utilitzar un capçal de menor diàmetre per tal de reduir les distàncies entre l'estructura de l'infill.

c) Falta d'adhesió entre capes

El tercer defecte que es va detectar va ser la falta d'adhesió entre diferents capes. Es va detectar falta d'unió entre capes de la paret i l'infill i entre capes de la paret. Aquest defecte va ser degut a la unió freda entre les diferents capes ja que la temperatura de la paret un cop li toca unir-se amb l'altre és massa baixa; reduint així la eficiència de la unió.

Aquesta tipologia de defecte es va detectar en algunes mostres 04_A i 04_B. A la Figura 5.14 es pot veure un exemple del defecte esmentat.

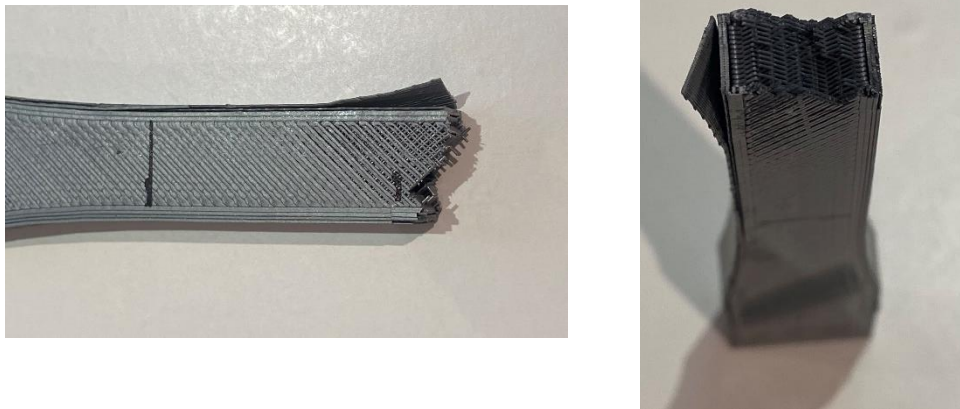


Figura 5.14 Detall de la falta d'adhesió de la mostra 04_B_4.

Aquest problema pot solucionar-se augmentant la temperatura d'extrusió del fil per tal d'enrederir el refredament de la part impresa.

d) Defectes deguts a la mala calibració dels eixos

Finalment, l'últim defecte que es va detectar va ser una superposició de capes deguda a una mala calibració dels eixos. Aquest fet s'ha exemplificat a la Figura 5.15, on es representa un desalineament relatiu entre els dos capçals degut a una mala calibració dels eixos.

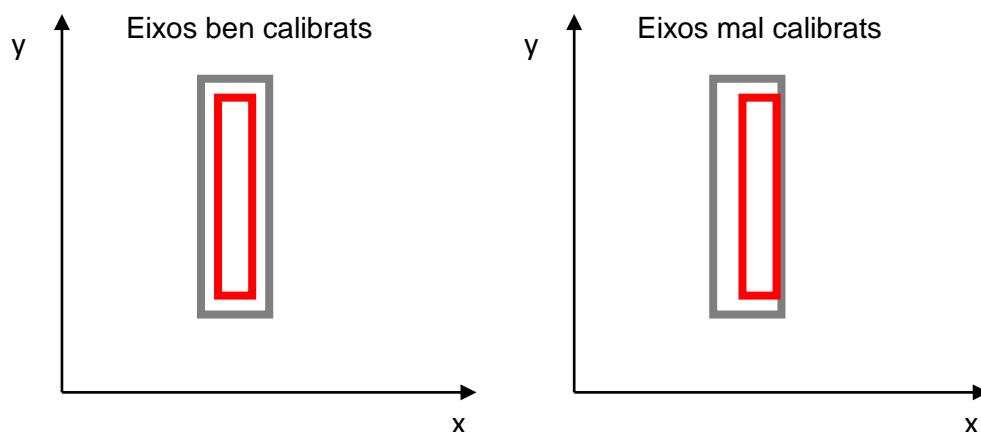


Figura 5.15 Representació d'una mala calibració dels eixos dels capçals.

A la figura de l'esquerra, tots dos capçals tenen les mateixes referències i per tant els patrons dibuixats no se superposen. En canvi, a la figura de la dreta hi ha un desplaçament relatiu entre les referències que prenen els capçals fent que les impressions se superposin. Aquest tipus de defecte es va detectar en les mostres DUAL_A i DUAL_B. A la Figura 5.16 es mostra un detall del resultat de imprimir amb una mala calibració.



Figura 5.16 Detall del resultat d'una mala calibració dels eixos (mostra DUAL_B_5).

La solució a aquest defecte és recalibrar els eixos per tal de que posseeixin les mateixes referències. D'aquesta manera s'assolirà una alineació entre les parts impreses i s'eliminarà el defecte.

5.4. Estudi dels temps d'impressió

La Taula 19 mostra les variables i els nivells estudiats, juntament amb el valor de la resposta, que és el temps d'impressió.

Taula 19 Variables, nivells i resposta de l'anàlisi factorial.

Sèrie	Capçal [mm]	Gruix de paret [mm]	Densitat d'infill [%]	Temps [min]
04_A	0,4	1,2	20	263
04_B	0,4	1,2	25	282
04_C	0,4	1,6	20	281
04_D	0,4	1,6	25	297
DUAL_A	0,4 i 0,8	1,2	20	244
DUAL_B	0,4 i 0,8	1,2	25	254
DUAL_C	0,4 i 0,8	1,6	20	260
DUAL_D	0,4 i 0,8	1,6	25	270

Un cop generat el disseny factorial s'han analitzat els resultats. A la Figura 5.17 es poden veure els factors que tenen un efecte significatiu sobre la resposta temps, on es representen amb quadrats vermells els factors i amb punts blaus les interaccions entre un i dos factors.

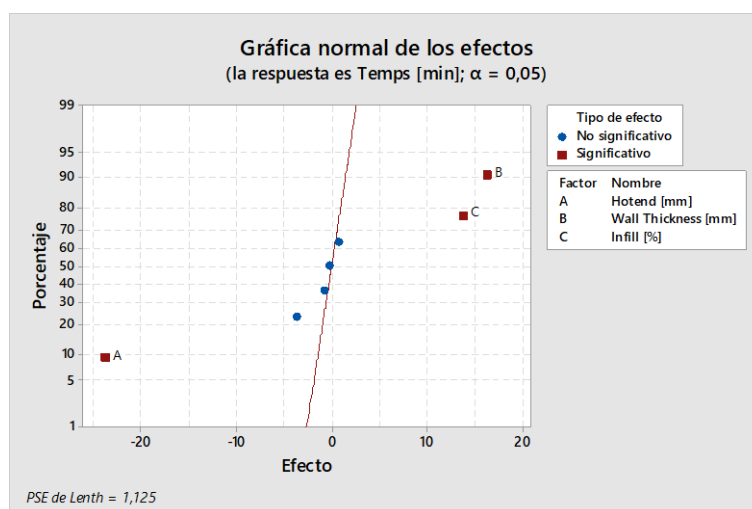


Figura 5.17 Gràfica dels tipus d'efectes.

Com era d'esperar, tots tres factors són significatius però no ho són les seves interaccions. Analitzant cada efecte principal per separat, la resposta temps es minimitza utilitzant el doble

extrusor, amb un gruix de paret de 1,2 mm i un valor d'infill del 20%; tal i com es pot veure a la Figura 5.18.

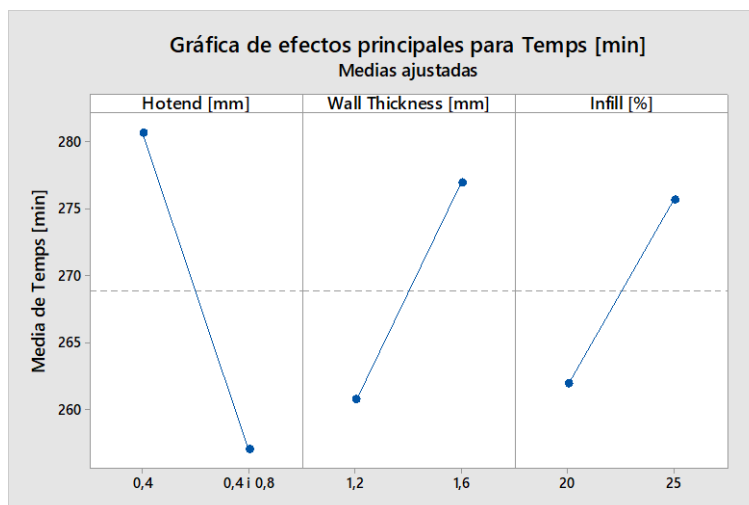


Figura 5.18 Gràfica dels efectes principals de la resposta Temps.

L'efecte més significatiu en la resposta és l'elecció de treballar amb un sol capçal de 0,4 mm o treballar amb un doble extrusor independent amb capçals de 0,4 mm i 0,8 mm. Si s'analitzen les mitjanes de tots dos casos, s'aprecia que la fabricació amb doble extrusor independent estalvia de mitjana 23,75 minuts a l'hora d'imprimir les cinc provetes. Aquest valor equivaldria aproximadament a estalviar quasi bé 5 minuts per cada proveta impresa.

Variable	Hotend [mm]	N	N*	Media	Desv.Est.
Temps [min]	0,4	4	0	280,75	13,91
	0,4 i 0,8	4	0	257,00	10,89

La possibilitat de poder treballar amb dos capçals de manera independent provoca un avantatge enfront una impressora d'un únic capçal.

Els efectes del infill i el gruix de paret influeixen en menor escala i de manera similar en tots dos casos.

Variable	Wall Thickness [mm]					Variable	Infill [%]				
		N	N*	Media	Desv.Est.			N	N*	Media	Desv.Est.
Temps [min]	1,2	4	0	260,75	16,15	Temps [min]	20	4	0	262,00	15,17
	1,6	4	0	277,00	15,85		25	4	0	275,75	18,23

Imprimir amb un gruix de paret més petit comporta de mitjana 16,25 min menys de temps que fabricar una mostra amb una paret de 1,6 mm. El fet d'imprimir amb un infill del 20 % en comptes del 25% comporta un estalvi del 13,75 min.

Si s'analitza la interacció entre l'ús del doble extrusor i el percentatge d'infill, es pot apreciar una certa tendència a augmentar la diferencia de la resposta (Figura 5.19).

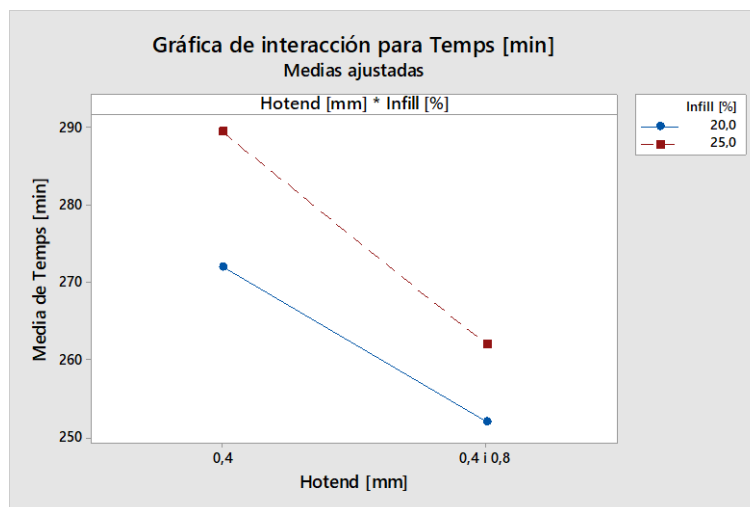


Figura 5.19 Gràfica dels efectes d'interacció entre infill i capçal de la resposta Temps.

Per ampliar l'estudi i valorar l'impacte de la interacció, es va simular la impressió de mostres amb un infill del 40 i 80 %. La interacció dels diferents infills amb els capçals es pot veure a la Figura 5.20.

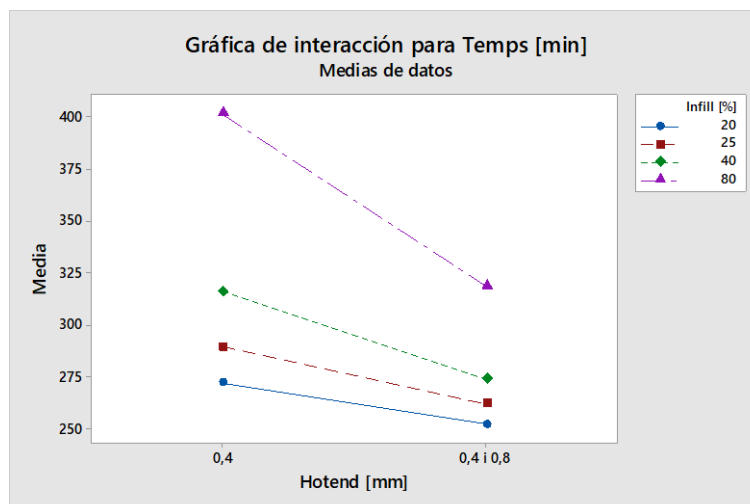


Figura 5.20 Gràfica dels efectes d'interacció entre més valors d'infill i capçal de la resposta Temps.

Al afegir valors d'infill més elevats es pot veure que la tendència vista entre els infills de 20 i 25% es fa més notable. Per tant, es pot concloure que a mesura que augmentem el nivell d'infill, l'avantatge d'utilitzar un doble extrusor independent en comptes d'un de simple es cada cop més rellevant.

5.5. Anàlisi de l'efecte de les variables en les diferents respostes estudiades

Un cop analitzades totes les respostes, es van relacionar entre elles per obtenir una visió més global dels efectes.

- El capçal utilitzat per fer l'infill, si be no afecta significativament els valors de la resistència a la tracció ni en el mòdul elàstic, sí que produeix una reducció molt notable de la deformació a fractura (Taula 17) i el treball de fractura (Taula 18), produint-se una fragilització important de les peces impreses quan s'utilitza un capçal de 0,8 mm per imprimir l'infill, comparativament amb el capçal de 0,4 mm. Això es pot atribuir a una distribució de tensions menys homogènia, que fa que per una mateixa deformació hi hagi punts on es concentren tensions més elevades, com mostra l'estudi per elements finits (Figura 5.10). Un altre aspecte que pot contribuir a la fragilització són els defectes detectats en les mostres impreses amb el capçal de 0,8 mm. Aquest paràmetre, per altra banda, és el que més afecta al temps d'impressió, reduint-lo significativament en passar del capçal de 0,4 al de 0,8 mm, però cal tenir en compte que la reducció en el temps estaria lligat a una disminució molt significativa de les propietats mecàniques i a una fragilització de les peces.
- El gruix de la paret té un efecte significatiu en les propietats mecàniques. La mostra impresa amb un gruix de paret de 1,6 mm, tot i tenir un percentatge d'infill menor a la mostra impresa amb un gruix de paret de 1,2 mm, té uns valors de resistència a la tracció aparent (Taula 11), mòdul d'elasticitat aparent (Taula 15) i treball a fractura (Taula 18) significativament superiors a la mostra amb un gruix de paret de 1,2 mm i un percentatge d'infill un 5 % superior. Això es pot atribuir a una distribució de tensions més homogènia, que fa que per una mateixa deformació hi hagi punts on la mostra amb una paret de 1,2 mm concentri tensions més elevades, com mostra l'estudi per elements finits (Figura 5.9). Respecte al temps d'impressió, el fet d'imprimir una paret de 1,6 mm comporta únicament un increment de 3,25 min per proveta respecte a imprimir-la de 1,2 mm. Per tant, utilitzant peces amb un gruix de paret de 1,6 mm millorarà significativament el comportament mecànic de la mostra afegint únicament 3,25 min d'impressió per cada proveta.
- Finalment, s'ha detectat que el paràmetre del percentatge d'infill, encara que té un efecte significatiu en el mòdul elàstic, no produeix diferències significatives en les altres propietats mecàniques avaluades.

6. ESTUDI ECONÒMIC

Per fer l'estudi econòmic del projecte realitzat és necessari valorar tant el temps utilitzat en totes les etapes de la seva elaboració així com el material utilitzat i el personal que ha contribuït a la seva realització. S'ha dividit el cost global en tres grans partides: costos de productes i llicències, costos d'equips i instal·lacions, i costos de personal.

Taula 20 Costos d'equips incloent la mà d'obra e instal·lacions.

CONCEPTE	QUANTITAT	PREU	COST
Impressió elements FDM	40 unitats	6,50 €/u	260 €
Assaig a tracció	20 unitats	-	1.800 €
TOTAL EQUIPS I INSTAL·LACIONS			2.060 €

Taula 21 Costos de productes i llicències.

CONCEPTE	QUANTITAT	PREU	COST
ANSYS	1	6.600 €	6.600 €
SolidWorks	1	2.178 €	2.178 €
Minitab 18	1	438,9 €	438,9 €
TOTAL PRODUCTES I LLICÈNCIES			9.216,9 €

S'ha tingut en compte la amortització dels programes informàtics, s'ha pres el valor màxim del 33% segons el Pla General Comptable (PGC) [91] per tal de diferir la tributació.

Taula 22 Costos de personal. En aquests costos s'ha pres com a referència el cost de cap d'enginyeria per al tutor i enginyer sènior per al doctorand.

CONCEPTE	QUANTITAT	PREU	COST
Tutor	35 h	40 €/h	1.400 €
Doctorand	360 h	20 €/h	7.200 €
TOTAL PERSONAL			8.600 €

La suma de tots els costos de material, equips i personal recopilats, equivalen al cost total aproximat de el treball final de màster. A continuació es presenta el resum de el cost total.

Taula 23 Cost total del treball fi de màster.

CONCEPTE	COST TOTAL
Equips i instal·lacions	2.060,00 €
Productes i llicències	9.216,90 €
Personal	8.600,00 €
TOTAL IVA INCLÒS	19.876,90 €

7. ESTUDI AMBIENTAL

7.1. Material d'impressió

La fabricació de les mostres s'ha realitzat amb PLA. Aquest material no es produeix amb combustibles fòssils sinó que la seva matèria prima són productes d'origen agrícola. Es recicla tot i que va perdent propietats a mesura que es reutilitza. Una altra propietat rellevant és el fet de ser biodegradable sota condicions fàcilment assolibles. La contrapartida a nivell ambiental és que la descomposició d'aquest material emet gasos perillosos per l'efecte hivernacle com poden ser el CH₄ i el CO₂. També cal destacar que si es mira el cicle de vida global, a l'hora d'obtenir la matèria prima, s'utilitzen combustibles fòssils perjudicials pel medi ambient.

7.2. Recursos utilitzats pels equips

Els equips comprats per a la realització d'aquests estudis comporten una sèrie d'impactes ambientals indirectes, degut principalment a:

- **Elaboració i funcionament:** consum de recursos materials i energètics, construcció d'instal·lacions i explotació de les mateixes, emmagatzematge, refrigeració, estufes ...
- **Transport:** es duu a terme mitjançant la utilització de combustibles fòssils, que tenen un impacte molt negatiu per emissions de partícules, diòxid de carboni ...
- **Deposició:** un cop finalitzada la vida útil dels equips, són dipositats en abocadors després d'un tractament previ per reduir l'impacte que puguin produir.

7.3. Serveis generals

La realització de qualsevol treball implica una despesa de serveis generals, que ha de ser esmentat. Es destaquen principalment els següents:

- **Electricitat:** generada majoritàriament per combustibles fòssils. Utilitzada en la seva majoria a les instal·lacions, explotació i distribució. Aquí també s'ha d'incloure la despesa d'electricitat a causa de l'aire condicionat i calefacció.
- **Aigua:** és un recurs cada vegada més valuós, emprat com a refrigerant, etc. Comporta una sèrie d'impactes deguts a les instal·lacions de distribució o al seu tractament.

Conclusions

La impressió 3D és una tecnologia que està en constant creixement i, per tant, és necessari avançar en matèria de recerca, amb la finalitat de conèixer les seves capacitats i també les seves dificultats, per a així poder millorar el procés. En aquest treball fi de màster s'ha analitzat la influència de diferents paràmetres d'impressió en el comportament mecànic de peces fabricades mitjançant la tècnica del filament fos. Aquests paràmetres van ser escollits analitzant diferents publicacions científiques on esmentaven quins eren els més rellevants. Un cop analitzats els resultats obtinguts mitjançant les tècniques de caracterització podem extreure les següents conclusions.

- [1] Les peces amb un infill imprès amb el capçal de 0,8 mm tenen una deformació a fractura i un treball de fractura significativament inferior a les que tenen un infill imprès amb el capçal de 0,4 mm, resultant en peces més fràgils, com demostren els resultats obtinguts en els assaigs de tracció.

La diferencia d'utilitzar un percentatge d'infill del 20 o 25% en termes de resistència a la tracció no es significativa però si que ho és a l'hora d'analitzar el mòdul d'elasticitat. La única mostra amb paret de 1,6 mm que es va poder assajar va donar uns resultats molt superiors a les demes, tot i que no s'ha pogut comparar directament amb les altres mostres assajades, degut a l'aturada dels assaigs pel confinament. Tot i això, els resultats obtinguts utilitzant una paret de 1,6 mm semblen indicar un augment molt significatiu de les propietats mecàniques que caldria estudiar en futurs treballs.

- [2] La simulació per elements finits ha demostrat que l'infill imprès amb el capçal de 0,4 mm ajuda a distribuir les tensions acumulades de manera més uniforme per tota l'estructura. En canvi les peces amb un infill imprès amb el capçal de 0,8 mm posseeixen zones de la cara superior amb una distribució de tensions poc homogènia, que fa que per una mateixa deformació hi hagi punts on es concentrin tensions més elevades, el que està d'acord amb la disminució de la deformació i el treball a fractura determinats experimentalment. Per altra banda, com era d'esperar el gruix de la paret també contribueix a una distribució de tensions més uniforme.

- [3] S'ha determinat que el fet d'imprimir l'infill amb un capçal de 0,8 mm, per una densitat d'infill determinada, provoca una sèrie de defectes, com la creació de porositats entre els filaments, el que pot estar relacionat amb la reducció de propietats mecàniques observades. Addicionalment provoca defectes en les capes superiors a causa del pes propi, al tenir massa espai entre suports i haver d'imprimir regions extenses en voladís.

- [4] S'ha determinat que el fet de poder imprimir amb un doble capçal independent redueix de manera considerable el temps d'impressió de la mostra, sobretot a mesura que el

nivell d'infill augmenta tot i que disminueix de manera significativa les propietats mecàniques de la peça.

Es important afegir que, caldria seguir investigant sobre aquesta línia de treball ja que degut al coronavirus s'han hagut de suspendre certs assaigs que haguessin aportat més dades per tal d'establir noves conclusions. A més a més es podrien incloure més paràmetres per veure com interactuen i milloren la resposta

Agraïments

El meu primer i més gran agraïment és per a Roger Uceda Molera, tutor d'aquest Treball Fi de Màster, per la seva gran dedicació, la seva confiança en les meves qualitats, els seus recursos per a superar tot tipus de problemes i sobretot, per acceptar la meva proposta de projecte. Gràcies també per totes les hores dedicades, donant-me suport en tot moment.

En segon lloc m'agradaria agrair a tot el personal de la Fundació CIM UPC pel tracte rebut durant tot el treball. Especialment a la Joana i a l'Oscar per ajudar-me en tot el que he necessitat. També m'agradaria agrair a la professora M. Magdalena Pastor la possibilitat de poder realitzar els assaigs al seu departament.

Finalment, no em vull oblidar dels meus pares, germans i amics, especialment d'Ares i Guillem, els qui sempre m'han motivat a seguir endavant.

Referències bibliogràfiques

- [1] 3DPRINT. *You Can Now See the First Ever 3D Printer - Invented by Chuck Hull - In the National Inventors Hall of Fame*. [Online]. Disponible a: <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>. [Visitat el 05 Oct. 2019].
- [2] BOURELL, D. L., BEAMAN, J. J. *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead*. 2009. Istanbul, Turkey.
- [3] 3D SYSTEMS. *Nuestra historia*. [Online] Disponible a: <https://es.3dsystems.com/our-story> [Visitat el 5 Oct. 2019].
- [4] GOLDBERG, D. *History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30)*. [Online]. Disponible a: <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>. [Visitat el 18 Oct. 2019].
- [5] D'AVENI, R. *The 3-D Printing Revolution*. [Online]. Disponible a: <https://hbr.org/2015/05/the-3-d-printing-revolution>. [Visitat el 18 Oct. 2019].
- [6] LISTEK, V. *Dr. Anthony Atala Explains the Frontiers of Bioprinting for Regenerative Medicine at Wake Forest*. [Online]. Disponible a: <https://3dprint.com/242602/dr-anthony-atala-explains-the-frontiers-of-bioprinting-for-regenerative-medicine-at-wake-forest/>. [Visitat el 18 Oct. 2019].
- [7] IMPRESORAS3D.COM. (2019). *Breve historia de la impresión 3D*. [Online]. Disponible a: <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/> [Visitat el 23 Oct. 2019].
- [8] CONTRERAS, L. *¿Vale la pena comprar una impresora 3D RepRap?*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dnatives.com/es/comprar-impresora-3d-reprap-300420182/>. [Visitat el 23 Oct. 2019].
- [9] ARANCA (2017). *Additive Manufacturing — The Next Industrial Revolution?*. [Online]. Disponible a: <https://www.aranca.com/knowledge-library/blogs-and-opinions/business-research/additive-manufacturing-the-next-industrial-revolution>. [Visitat el 24 octubre, 2019].
- [10] 3DNATIVES (2019). *Gartner Hype Cycle 2019: 3D Printing Predictions*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dnatives.com/en/gartner-hype-cycle-3dprintingpredictions-150120194/>. [Visitat el 24 octubre 2019].
- [11] AECOC. *La maduración de la fabricación aditiva: aplicaciones de la vida real*. [Online]. Disponible a: <https://www.aecoc.es/innovation-hub-noticias/la-maduracion-de-la-fabricacion-aditiva-aplicaciones-de-la-vida-real/>. [Visitat el 27 octubre 2019].
- [12] AM. *What is Additive Manufacturing?*. [Online]. Disponible a: <https://additivemanufacturing.com/basics/>. [Visitat el 29 octubre 2019].
- [13] ISO/ASTM 52900:2015 *Additive manufacturing — General principles — Terminology* (Comitès responsables ISO TC 261 i ASTM F-42).

- [14] 3DWORK. *Tecnologías de impresión 3D (FFF, SLA, SLS, SLM, DOD y Binder Jetting)*. [Online]. Disponible a: <https://www.3d-work.es/tecnologias-de-impresion-3d/>. [Visitat el 13 setembre 2019].
- [15] APM DESIGNS. *FDM vs SLA: A Direct Comparison Guide – 3D Printing explained*. [Online]. Disponible a: <http://apm-designs.com/fdm-vs-sla-3d-printer-tech-comparison/>. [Visitat el 20 octubre, 2019].
- [16] FLYNT, J. *What is SLA 3D Printing?*. [Online]. Disponible a: <https://3dinsider.com/what-is-sla/>. [Visitat el 20 octubre 2019].
- [17] IKUTA, K. *Ultra high resolution stereolithography for three dimensional micro fabrication*. Proceedings of the Fourth International Conferences on Rapid Prototyping, 1994, p. 37-46. Kyushu Institute of Technology.
- [18] FLYNT, J. *SLA vs DLP: Which One Is Better?*. [Online]. Disponible a: <https://3dinsider.com/sla-vs-dlp/>. [Visitat el 20 octubre, 2019].
- [19] KOCHAN, D., R. HOVTUN. *Precise and optimized process realization for solid ground curing*. Proceedings of the Fourth International Conferences on Rapid Prototyping, 1994, p. 37-46.
- [20] GREGURIĆ, L. *What Is a DLP 3D Printer? – Simply Explained*. [Online]. Disponible a: <https://all3dp.com/2/what-is-a-dlp-3d-printer-3d-printing-simply-explained/>. [Visitat el 25 octubre, 2019].
- [21] WEINER, H. *Fused Filament Fabrication – Simply Explained*. [Online]. Disponible a: <https://all3dp.com/2/fused-filament-fabrication-fff-3d-printing-simply-explained/>. [Visitat el 25 octubre, 2019].
- [22] CONTRERAS, L. *El MIT lanza una impresora 3D FDM 10 veces más rápida*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dnatives.com/es/impresora-3d-fdm-rapida-301120172/>. [Visitat el 23 octubre, 2019].
- [23] GIBSON, I., ROSEN, D., STUCKER, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, 2nd edition. Doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [24] SCULPTEO. *LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing with Layers of Paper*. [Online]. Disponible a: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>. [Visitat el 27 octubre, 2019].
- [25] *Different Types of 3D Printing Methods for 3D Printers*. [Online]. Disponible a: <https://3d-printing-expert.com/different-types-of-3d-printing-for-3d-printers/>. [Visitat el 27 octubre, 2019].
- [26] CHUA, C., CHOU, S., WONG, T. *A Study of the State-of-the-Art Rapid Prototyping Technologies*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 1998, p. 146-152.
- [27] ENGINEERING PRODUCT DESIGN. *How Powder Bed Fusion Works*. [Online]. Disponible a: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/powder-bed-fusion/>. [Visitat el 27 octubre, 2019].

- [28] 3DILIGENT *Powder Bed Fusion 3D Printing (Additive Manufacturing)*. [Online]. Disponible a: <https://www.3diligent.com/prodex/technologies/3d-printing/powder-bed-fusion/>. [Visitat el 27 octubre, 2019].
- [29] LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. *Powder Bed Fusion*. [Online]. Disponible a: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>. [Visitat el 28 octubre, 2019].
- [30] STARKWEATHER, G. *A high resolution laser printing system*. Second International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technologies, 1984, p. 198.
- [31] ALEXANDREA, P. *The Complete Guide to Binder Jetting in 3D printing*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/>. [Visitat el 31 octubre, 2019].
- [32] LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. *Binder Jetting*. [Online]. Disponible a: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/binderjetting/>. [Visitat el 31 octubre, 2019].
- [33] BOURNIAS, A. *Introduction to Binder Jetting 3D printing*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/#what>. [Visitat el 31 octubre, 2019].
- [34] EXONE. *What is binder jetting?* [Online]. Disponible a: <https://www.exone.com/en-US/case-studies/what-is-binder-jetting>. [Visitat el 31 octubre, 2019].
- [35] BOURNIAS, A. *Introduction to Material Jetting 3D Printing*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>. [Visitat el 5 novembre, 2019].
- [36] LOUGHBOROUGH UNIVERSITY. *Material Jetting*. [Online]. Disponible a: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>. [Visitat el 5 novembre, 2019].
- [37] AMFG. *Metal 3D Printing: What is Direct Energy Deposition?* [Online]. Disponible a: <https://amfg.ai/2018/09/27/metal-3d-printing-what-is-direct-energy-deposition/>. [Visitat el 5 novembre, 2019].
- [38] DIGITAL ALLOYS. *Directed Energy Deposition (DED)*. [Online]. Disponible a: <https://www.digitalalloys.com/blog/directed-energy-deposition/>. [Visitat el 5 novembre, 2019].
- [39] V., C. *The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>. [Visitat el 7 novembre, 2019].
- [40] BOURNIAS, A. *Introduction to FDM 3D printing*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>. [Visitat el 7 novembre, 2019].
- [41] TRES DP. *Guia Diseño*. [Online]. Disponible a: <https://tresdp.com/guia-diseno/>. [Visitat el 7 novembre, 2019].
- [42] IMPRIMALIA3D. *Aportaciones al conocimiento sobre la fabricación aditiva con la*

- tecnología Fused Deposition Modeling - Impresoras 3D*. [Online]. Disponible a: <http://imprimalia3d.com/recursosimpresion3d/aportaciones-al-conocimiento-sobre-fabricacion-aditiva-tecnologia-fused-deposition>. [Visitat el 7 novembre, 2019].
- [43] YUSUF, B. *Leapfrog Bolt is a Supercharged IDEX 3D Printer*. [Online]. Disponible a: <https://all3dp.com/leapfrog-bolt/>. [Visitat el 11 novembre, 2019].
- [44] COLYER, J. *Watch: BCN3D's vast 3d printing farm*. [Online]. Disponible a: <https://3dprintingindustry.com/news/watch-bcn3ds-vast-3d-printing-farm-157880/>. [Visitat el 11 novembre, 2019].
- [45] COLORIFILAMENT. *FormBot T-Rex 2+ 700*. [Online]. Disponible a: <https://3d.colorifilament.com/en/3d-printers/1328-formbot-t-rex-2-700>. [Visitat el 11 novembre, 2019].
- [46] ŚLUSARCZYK, P. *BCN3D Sigma R19 – working in copy and mirror mode*. [Online]. Disponible a: <https://3dprintingcenter.net/2019/12/26/bcn3d-sigma-r19-working-in-copy-and-mirror-mode/>. [Visitat el 12 novembre, 2019].
- [47] BCN3D. *IDEX Technology*. [Online]. Disponible a: <https://www.bcn3d.com/technology/>. [Visitat el 12 novembre, 2019].
- [48] BCN3D. *IDEX Technology for low volume batch production: Doubling productivity at the BCN3D Print Farm*. [Online]. Disponible a: <https://www.bcn3d.com/idex-technology-bcn3d-print-farm-low-volume-batch-production/>. [Visitat el 12 novembre, 2019].
- [49] LEAPFROG. *Independent Dual Extruders*. [Online]. Disponible a: https://www.lpfrog.com/guides/benefits-of-independent-dual-extruders/?utm_source=twitter&utm_medium=strategy&utm_campaign=strategy. [Visitat el 12 novembre, 2019].
- [50] CAIN, P. *The impact of layer height on a 3D Print*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/impact-layer-height-3d-print/>. [Visitat el 14 novembre, 2019].
- [51] SIBER, B. *3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained*. [Online]. Disponible a: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>. [Visitat el 14 novembre, 2019].
- [52] I.MATERIALISE. *Design Guide | ABS 3D Printing*. [Online]. Disponible a: <https://i.materialise.com/en/3d-printing-materials/abs/design-guide>. [Visitat el 15 novembre, 2019].
- [53] TRAN, W. B. R. *Recommended Wall Thickness for 3D Printing | Fictiv - Hardware Guide*. [Online]. Disponible a: <https://www.fictiv.com/hwg/fabricate/recommended-wall-thickness-for-3d-printing>. [Visitat el 15 novembre, 2019].
- [54] ENDPARTS. *¿Qué es el patrón de relleno para una pieza?* [Online]. Disponible a: <http://endparts.com/es/patron-de-relleno/>. [Visitat el 15 novembre, 2019].
- [55] BCN3D. *Introduction to FFF technology and its most important parameters*. [Online]. Disponible a: <http://www.bcn3d.com/introduction-fff-technology-3d-printing-important-parameters/>. [Visitat el 15 novembre, 2019].

- [56] PRINTERS3D. *Fused Deposition Modeling | FDM 3D Printer Technology*. [Online]. Disponible a: <https://3dprinterss.com/fused-deposition-modeling-3d-printer/>. [Visitat el 21 novembre, 2019].
- [57] LULZBOT. *3D Pinter Buyers Guide | FFF vs SLA vs SLS*. [Online]. Disponible a: <https://www.lulzbot.com/learn/tutorials/2019-3d-printer-buyers-guide-compare-technologies>. [Visitat el 19 novembre, 2019].
- [58] FORMLABS. *3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS*. [Online]. Disponible a: <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>. [Visitat el 19 novembre, 2019].
- [59] BCN3D. *Datasheet Sigma R19*. [Online]. Disponible a: <http://www.bcn3d.com/wp-content/uploads/2019/10/Datasheet-Sigma-R19-EN.pdf>
- [60] BCN3D. *Anàlisi del sistema d'extrusió Sigma i Sigmax R19: associació amb els fabricants e3DTM i BondtechTM*. [Online]. Disponible a: <https://www.bcn3d.com/ca/analisi-del-sistema-dextrusio-sigma-i-sigmax-r19-associacio-amb-els-fabricants-e3d-i-bondtech>. [Visitat el 29 novembre, 2019].
- [61] FILAMENT2PRINT. *Cómo evitar atascos en el extrusor de la impresora 3D*. [Online]. Disponible a: https://filament2print.com/es/blog/14_evitar-atascos-extrusor-impresora-3d.html. [Visitat el 29 novembre, 2019].
- [62] ELMUNDO3D. *Extrusor: Componentes impresora 3D*. [Online]. Disponible a: <https://elmundo3d.com/extrusor/>. [Visitat el 29 novembre, 2019].
- [63] 3R3D. *BCN3D Sigma - Impresora doble extrusor*. [Online]. Disponible a: <https://www.3r3dtm.com/producto/bcn3d-sigma-impresora-doble-extrusor>. [Visitat el 29 novembre, 2019].
- [64] BOOTS INDUSTRIES. *Heat Beds in 3D Printing – Advantages and Equipment*. [Online]. Disponible a: <http://bootsindustries.com/heat-bed-3d-printing/>. [Visitat el 30 novembre, 2019].
- [65] 3DNATIVES. *Guía completa: plásticos en la impresión 3D*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>. [Visitat el 3 desembre, 2019].
- [66] BLASCO, L. S. *Impresión 3D por compactación o solidificación de materiales*. [Online]. Disponible a: <https://www.cosasdearquitectos.com/2014/04/impresion-3d-por-compactacion-de-o-solidificacion-de-materiales/>. [Visitat el 3 desembre, 2019].
- [67] WANG X, JIANG M, et al. *3D printing of polymer matrix composites: a review and prospective*. Composites Part B: Engineering, Volume 110, 2017, p. 442-458.
- [68] LOCKER, A. *Impresoras 3D metal: todo sobre la impresión 3D de metal*. [Online]. Disponible a: <https://all3dp.com/es/1/impresion-3d-metal-impresora-3d-metal/#section-metales-para-impresion-3d>. [Visitat el 3 desembre, 2019].
- [69] SCULPTEO. *Material de Impresión 3D: Titanio 6Al-4V*. [Online]. Disponible a: <https://www.sculpteo.com/es/materiales/dmls-materiales/dmls-materiales-titanio/>. [Visitat el 3 desembre, 2019].

- [70] WOHLERS, T. *3D Printing and Additive Manufacturing, State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report*. Wohlers Associates Incorporated, 2014.
- [71] CAMPOS, T. *Esta prótesis de pierna impresa en 3D, tiene las 3B*. [Online]. Disponible a: <https://www.xataka.com.mx/investigacion/esta-protesis-de-pierna-impresa-en-3d-tiene-las-3b>. [Visitat el 6 desembre, 2019].
- [72] 3DNATIVES. *Impresión 3D de cerámica: ¿Revolución dentro de la fabricación aditiva?* [Online]. Disponible a: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-de-ceramica-170420192/>. [Visitat el 8 desembre, 2019].
- [73] KEEP, J. *RepRap para piezas de cerámica - Impresión 3D*. [Online]. Disponible a: <http://impresoras3d-otras.blogspot.com/2012/06/reprap-para-piezas-de-ceramica.html>. [Visitat el 8 desembre, 2019].
- [74] BAEURLE, A. et al. *On the glassy state of multiphase and pure polymer materials*. Polymer, vol. 47, núm. 17, 2006, pàg. 6243-6253.
- [75] PLABS3D. *Obtención del ABS*. [Online]. Disponible a: <https://recicla3dplabs.wordpress.com/obtencion-del-abs/>. [Visitat el 8 desembre, 2019].
- [76] UB | CMEmaterials. *Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)*. [Online]. Disponible a: <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs>. [Visitat el 8 desembre, 2019].
- [77] SIIM, *Propiedades físico-mecánicas del ABS*. [Online]. Disponible a: <http://www.siim.com/docs/RAE-1018.pdf>. [Visitat el 8 desembre, 2019].
- [78] TECNOLOGÍA DEL PLÁSTICO. *LEGO deja el Acrilonitrilo Butadieno Estireno ABS por bioplásticos*. [Online]. Disponible a: <http://www.plastico.com/temas/En-la-busqueda-de-ese-material,-LEGO-investiga-los-bioplasticos+96582> Propiedades PLA. [Visitat el 8 desembre, 2019].
- [79] HXX. *Materiales de impresión 3D (I): PLA (ácido poliláctico)*. [Online]. Disponible a: <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>. [Visitat el 8 desembre, 2019].
- [80] FLYNT, J. *Polylactic Acid (PLA): The Environment-friendly Plastic*. [Online]. Disponible a: <https://3dinsider.com/what-is-pla/>. [Visitat el 8 desembre, 2019].
- [81] CASTRO, M. A. *PLA. Material, Interés y consejos de impresión*. [Online]. Disponible a: <http://www.dima3d.com/pla-material-interes-y-consejos-de-impresion-3/>. [Visitat el 20 novembre, 2019].
- [82] ARTEAGA MEDINA, L. *Trabajo Fin de Grado: Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados*. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, Universidad de La Laguna. 2015.
- [83] ASHBY, M. F. *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. Oxford: Butterworth-Heinemann. 2009.
- [84] 3d Matter *FDM 3D Printing materials compared*. [Online]. Disponible a: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/#results>. [Visitat el 20 novembre, 2019].

- [85] SIMPLYFY3D. *Filament Properties Table*. [Online]. Disponible a: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/?filas=abs,pla,nylon>. [Visitat el 22 novembre, 2019].
- [86] TYMRAK, B., KREIGER, M., PEARCE, J. *Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions*. Materials and Design 58, 2014, p. 242-246.
- [87] HEDO GARCÉS, D. *Trabajo Fin de Grado: Herramienta para la definición de diferentes estrategias de impresión en tecnología FDM. Ensayos mecánicos*. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza. 2015.
- [88] ASTM D638-02a. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2003.
- [89] PASTOR, M.M., BUJ, I. *Elastic asymmetry of PLA material in FDM-printed parts: considerations concerning experimental characterisation for use in numerical simulations*. "Materials", 18 Desembre 2019, vol. 13, núm. 1, p. 25:1-25:24.
- [90] VIDAKIS, N., et al. *Fused Deposition Modelling Parts Tensile Strength Characterisation*. Academic Journal of Manufacturing Engineering. 14, 2016, p. 87-94.
- [91] RD 1514/2007, de 16 de novembre, per al que s'aprova el Pla General de Contabilitat..